USZCZELNIAJĄCE SPOIWA IŁOWO-CEMENTOWE – MIKROSTRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI

WÓJCIK Ł.[1], IZAK P.[1], KUŚ R.[2]

[1] *Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, al. Mickiewicza 30, 30-065 Kraków, Polska, e-mail: lukwoj@agh.edu.pl , izak@agh.edu.pl*
[2] *Przedsiębiorstwo Robót Geologiczno-Wiertniczych G.Janik R.Kuś s.j., ul. Nowopogońska 4, 41-200 Sosnowiec, Polska, e-mail: roman_k@prgw.com.pl*

Streszczenie : *Spoiwa iłowo-cementowe znajdują zastosowanie głównie przy budowie i konserwacji budowli hydrotechnicznych, gdzie głównym czynnikiem przydatności jest ich duża szczelność. Jednak poprzez modyfikacje ich właściwości mogą one być stosowane również w innych gałęziach budownictwa.*

W pracy scharakteryzowano właściwości reologiczne i użytkowe spoiw uszczelniających sporządzonych na bazie zawiesin iłowo-cementowych. Zbadano wpływ zmian składu wodnych zawiesin w układzie ił-cement-modyfikator na ich właściwości reologiczne. Wyznaczono krzywe płynięcia oraz sztywność struktur pseudotiksotropowych. Przeprowadzono obserwacje SEM zarówno świeżych jak i stwardniałych spoiw. Na ich podstawie określono procesy fizykochemiczne, które wpływają na zachowania reologiczne zawiesin oraz powstającą wewnętrzną strukturę. Na stwardniałych spoiwach określono ich parametry użytkowe.

Słowa kluczowe: *spoiwa iłowo-cementowe, współczynnik filtracji, pseudotiksotropia*

Abstract : *Clay-cement based binders are finding application mainly in construction and the maintenance of hydrotechnical buildings, where their very low filtration coefficient is a main factor of the usefulness. However, by the changes of their properties they can be applied also in other branches of the construction*

The rheological and the usable proprieties of sealing binders prepared on the base of clay-cement suspensions were characterized in this work. The influence of the changes of the composition on rheological properties of water suspensions in the configuration clay-cement-modifier was examined. The flow curves and the stiffness of pseudothiksotrophy structures was marked. Observations SEM were conducted both fresh and hardened binders. On this basis physics-chemical processes, which influence on the rheological behaviours of suspensions and the coming into being internal structure were define. The usable parameters were qualified on hardened binders.

Keywords : *clay-cement binders, filtration coefficient, pseudo-thixotropy*

1. Wstęp

Budowa i konserwacja budowli hydrotechnicznych, takich jak wały przeciwpowodziowe, groble czy zapory wodne często wymaga stosowania materiałów i operacji technicznych, które ograniczą przepływ wody poprzez budowlę. Używane do tego materiały powinny oprócz bardzo dobrych właściwości hydroizolacyjnych cechować się także niskim kosztem i łatwością wytworzenia. Do naprawy i modyfikacji wałów przeciwpowodziowych najczęściej stosuje się zaczyny uszczelniające, które wprowadza się w konstrukcję wału za pomocą różnych technik wiertniczych, umożliwiających utworzenie w przekroju wału szczelnej przegrody hydroizolacyjnej, bądź wypełnienie występujących w nich spękań i ubytków. Ma to na celu przywrócenie szczelności poprzez likwidację tzw. przesiąków, przez co głównym czynnikiem decydującym o przydatności materiału użytego do wykonania przesłony jest jego zdolność do zatrzymywania wody. Zdolność ta określana jest za pomocą współczynnika filtracji „k", którego wartość powinna być mniejszo od $1 \cdot 10^{-8}$m/s. Poniżej tej wartości materiał uważa się za nieprzepuszczalny dla wody.

Zawiesiny uszczelniające i wzmacniające sporządza się na bazie różnych materiałów. Stosuje się żele szkła wodnego, żywice organiczne, jednak najczęściej stosowane są zawiesiny iłowe z dodatkiem cementu, których właściwości są modyfikowane różnymi dodatkami. Najczęściej stosuje się bentonit a także popioły lotne, żużle wielkopiecowe, mączkę wapienną i inne.

Interesującą alternatywą dla mieszanek bentonitowych są mieszaniny iłowo-cementowe. Mogą one konkurować z nimi pod względem osiąganych parametrów, przy jednoczesnej znacznej redukcji kosztów wytwarzania głównie związanej z eliminacją drogiego bentonitu oraz aspektami logistycznymi.

3. Przedmiot badań

Przedmiotem badań były próbki spoiw iłowo-cementowych sporządzonych w laboratorium z wykorzystaniem surowców:

1. Surowce ilaste:
   - glina smektytowo-kaolinitowa
   - glina smektytowo-illitowa
   - glina illitowo-smektytowa
   - surowiec kaolinitowy

2. Surowce wiążące:
   - cement portlandzki CEM I 32,5 R z cementowni Nowiny

3. Modyfikator
   - szkło wodne sodowe R145, o gęstości 1,47g/cm^3 i module 2,22

Głównym celem analiz w takich konfiguracjach minerałów ilastych było wykorzystanie ich do aplikacji w rejonie ich występowania. Bowiem „czyste" minerały ilaste w przyrodzie praktycznie nie występują. Dlatego też skoncentrowano się głównie na badaniach zawiesin smektytowo-kaolinitowych.

2. Metodyka badawcza

W niniejszej pracy badania laboratoryjne podzielono na dwa etapy. W etapie pierwszym scharakteryzowano świeże zawiesiny iłowo-cementowe, przeprowadzając pomiary reologiczne oraz obserwacje przy pomocy mikroskopu skaningowego z analizą chemiczną w mikroobszarach EDS odpowiednio po 15, 30, 60 i 120 minutach od sporządzenia.

W etapie drugim scharakteryzowano stwardniałe spoiwa iłowo-cementowe przeprowadzając obserwacje SEM wraz analizą EDS po: 3, 7, 14, 28 i 150 dniach dojrzewania. Przeprowadzono pomiary współczynnika filtracji oraz wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe.

2.1. *Pomiary reologicznych*

Badania reologiczne prowadzono przy pomocy reometru Brookfield DV – III$^+$, wyposażonego w układ termostatyczny TC 500, który mierzy naprężenia styczne lub lepkości płynu, odpowiadające zadanym wartościom szybkości ścinania. Wszystkie pomiary na reometrze prowadzono przy użyciu programu Rheocalc for Windows.

Zbadano wpływ zmiany udziału poszczególnych składników zaczynów na ich własności reologiczne. Określono wpływ zmian gęstości zawiesiny bazowej, wpływ zmian ilości cementu, ilości szkła wodnego oraz rodzaju i konfiguracji minerałów ilastych na krzywe płynięcia spoiw hydroizolacyjnych.

Przeprowadzono cztery serie badań. W trzech pierwszych użyto gliny smektytowo-kaolinitowej, zmieniając kolejno gęstość zawiesiny bazowej (iłowo-wodnej), udział cementu i udział modyfikatora. W serii czwartej zmianie ulegał surowiec ilasty. Wszystkie pomiary przeprowadzono na próbkach bezpośrednio po sporządzeniu, w temperaturze 20ºC.

Pomiary wykazały wyraźny wzrost naprężeń ścinających zawiesin wraz ze wzrostem gęstości zawiesin bazowych. Wraz ze wzrostem gęstości uwidaczniają się przegięcia krzywych płynięcia, w

zakresie szybkości ścinania od 5 do 10 s^{-1} oraz charakterystyczne maksima naprężeń ścinających. W zakresie wyższych szybkości ścinania, tj. >10 s^{-1} następuje wyraźna stabilizacja naprężeń. Oznacza to zjawisko rozrzedzania ścinaniem (przepływ pseudoplastyczny) przy wzrastającej szybkości ścinania.

Badania wykazały, że zjawisko rozrzedzania ścinaniem jest uzależnione od gęstości zawiesin bazowych. Powrotne krzywe płynięcia odpowiadające zmniejszającej się szybkości ścinania lokalizują się poniżej krzywych rejestrowanych przy wzrastającej szybkości ścinania i wykazują właściwości tiksotropowe.

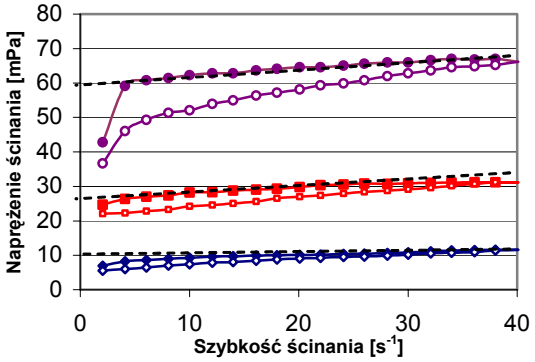


Fig. 1. Krzywe płynięcia zawiesin bazowych na osnowie gliny smektytowo-kaolinitowej o różnych gęstościach.

Interpolacja naprężeń ścinających równowagowych, tj. w zakresie szybkości ścinania od 15 do 40 s^{-1} do osi rzędnych daje wartość naprężeń ścinających występujących w czasie aplikacji zaczynów uszczelniających. Ich pochodna względem szybkości ścinania, jest tzw. średnią lepkością plastyczną lub lepkością Cassona (Rys. 1). Wzrost gęstości zawiesin bazowych przy stałym udziale cementu i szkła wodnego znacząco zwiększa granicę równowagowych wartości naprężeń ścinających. Zależność ta w przedziale 1-1,25g/cm^3 opisana jest funkcją kwadratową na poziomie ufności ok. 98 % (Rys. 2)

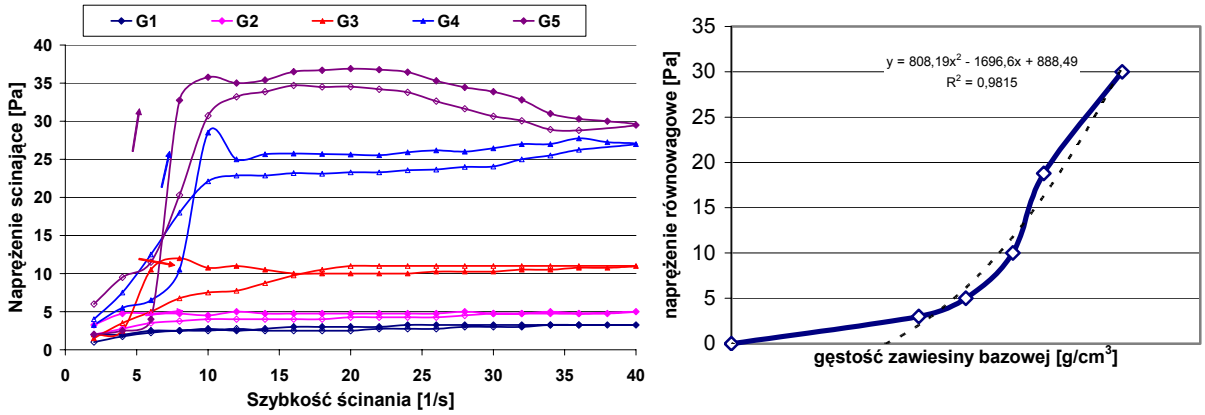


Fig. 2. Wpływ gęstości zawiesiny bazowej na krzywe płynięcia i równowagowe naprężenia ścinające zawiesin hydroizolacyjnych.

Badania wykazały, że zawiesina bazowa na osnowie gliny smektytowo-kaolinitowej charakteryzuje się przepływami typu Cassona z minimalną granicą płynięcia i zachowują dużą powtarzalność przy kolejnych cyklach zmian szybkości ścinania.

W serii drugiej badań zmienny był udział cementu przy stałej wartości gęstości zawiesiny bazowej i modyfikatora. Pomiary reologiczne wykazały znaczący wzrost naprężeń ścinających (lepkości pozornych) zaczynów, wraz ze wzrostem ilości cementu. We wszystkich przypadkach widoczne są charakterystyczne przegięcie krzywych płynięcia i maksima wartości w zakresie szybkości ścinania od 5 do 15 s^{-1}. Sukcesywny wzrost udziału cementu przesuwa przegięcia w kierunku niższych wartości szybkości ścinania. Przy wyższych szybkości ścinania (tj. >15 s^{-1}) następuje stabilizacja naprężeń ścinających (przepływ pseudoplastyczny) (Rys. 3).

W trzeciej serii prób zmieniano udział modyfikatora przy stałej wartości gęstości bazowej i cementu. Pomiary w tym przypadku wykazały zarówno wzrost naprężeń ścinających jak i lepkości

pozornej, w miarę zwiększenia udziału szkła wodnego. We wszystkich przypadkach w zakresie szybkości ścinania od 5 do 15 s^{-1} widoczne były charakterystyczne maksima oraz przegięcia krzywych płynięcia. (Rys.4.). Wraz ze wzrostem ilości szkła wodnego, przegięcie to przesuwa się w kierunku wyższych wartości szybkości ścinania.

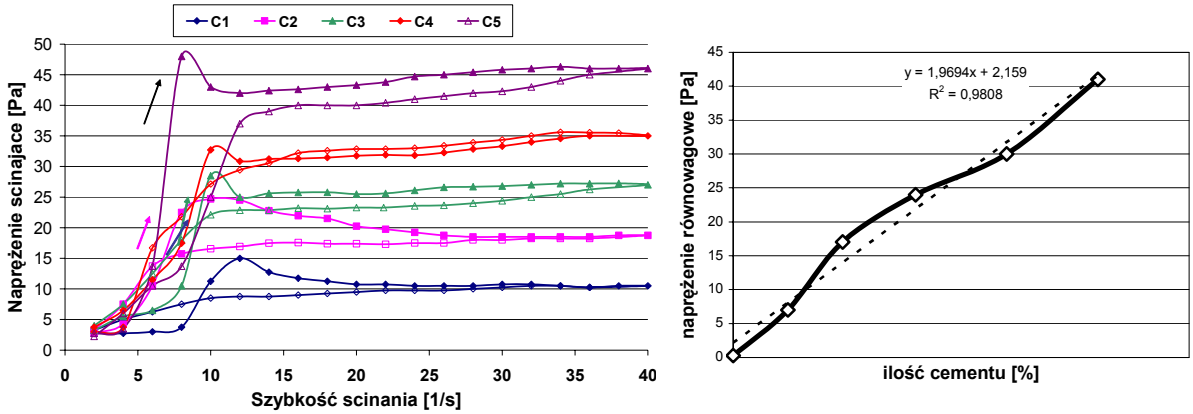


Fig. 3. Wpływ ilości cementu na krzywe płynięcia i równowagowe naprężenia ścinające zaczynów hydroizolacyjnych.

W przypadku braku szkła wodnego, maksimum przypada dla szybkości ścinania ok. 6 s^{-1}, zaś w przypadku dodatku na poziomie 1,5% lokalizuje się dla szybkości ścinania równej 14 s^{-1}. Przy wyższych szybkości ścinania (>15 s^{-1}), następuje stabilizacja naprężeń ścinających (przepływ pseudoplastyczny). Wyjątkiem jest spoiwo z największym dodatkiem szkła wodnego. W tym przypadku wartości naprężeń ścinających maleją ze wzrostem szybkości ścinania. Krzywe powrotne odpowiadające zmniejszającej się szybkości ścinania, mają we wszystkich przypadkach podobny przebieg i wykazują zjawiska pseudotiksotropii. Interpolacja naprężeń ścinających równowagowych tj. w zakresie szybkości ścinania od 15 do 40 s^{-1} do osi rzędnych określa wartość granicy płynięcia występujących w czasie aplikacji zaczynów uszczelniających.

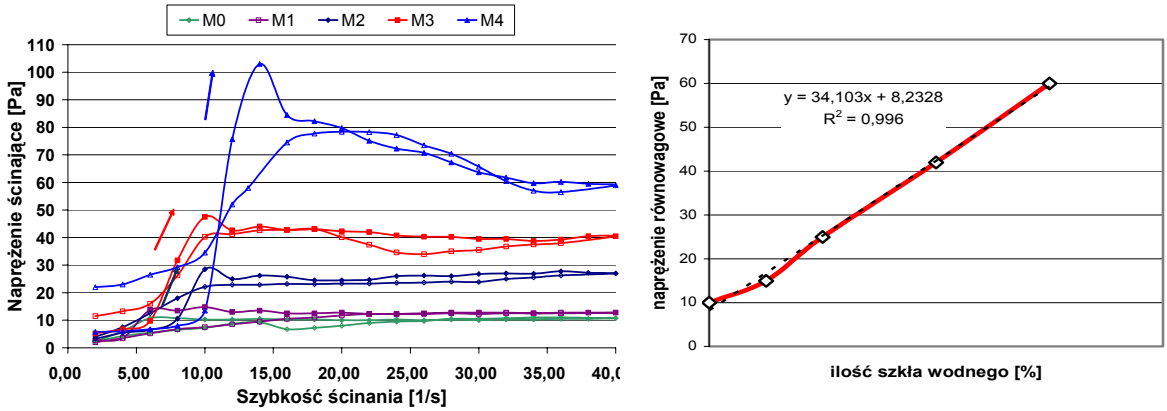


Fig. 4. Wpływ ilości szkła wodnego na krzywe płynięcia i równowagowe naprężenia ścinające zaczynów hydroizolacyjnych.

W serii czwartej wykonano pomiary przebiegu krzywych płynięcia dla zawiesin uszczelniających sporządzonych z różnych mieszanin minerałów ilastych. Mając na względzie różne pochodzenie badanych skał osadowych, pomiary właściwości reologicznych wykonano dla trzech różnych ilości cementu, trzech różnych gęstości zawiesin bazowych przy stałym udziale modyfikatora (Rys. 5).

Wszystkie zawiesiny bazowe charakteryzują się przepływami typu Cassona i zachowują dużą powtarzalność przy kolejnych cyklach zmian szybkości ścinania. Z wyjątkiem zawiesin kaolinitowych (Rys. 5D) pozostałe wykazują właściwości tiksotropowe. Przeprowadzone pomiary

na zawiesinach uszczelniających tj. zarówno z udziałem dodatków strukturotwórczych jak przy zmiennych gęstościach zawiesin bazowych, wykazały różne zależności pomiędzy naprężeniem i szybkością ścinania. Ogólnie najniższe opory przepływu (naprężenie ścinania), obserwuje się w próbkach o najniższej gęstości oraz zawierających najmniejsze udziały cementu.

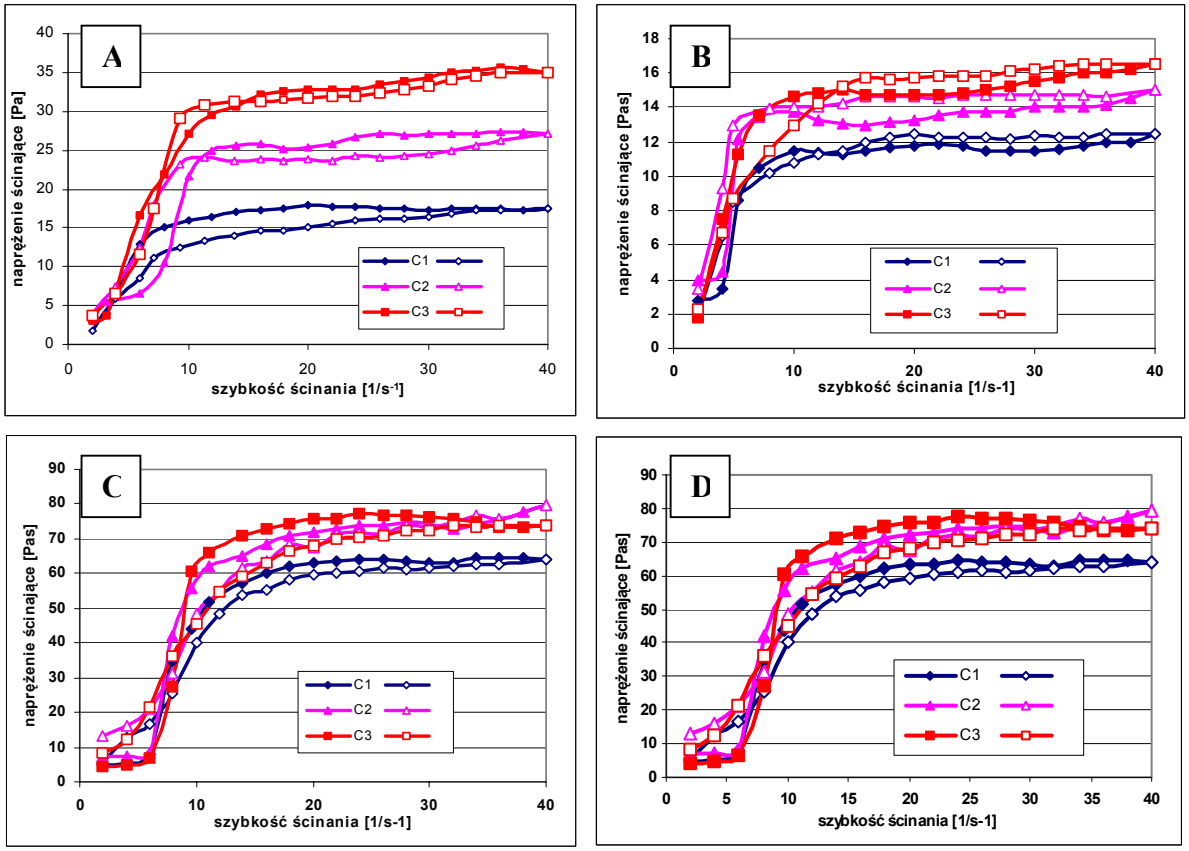
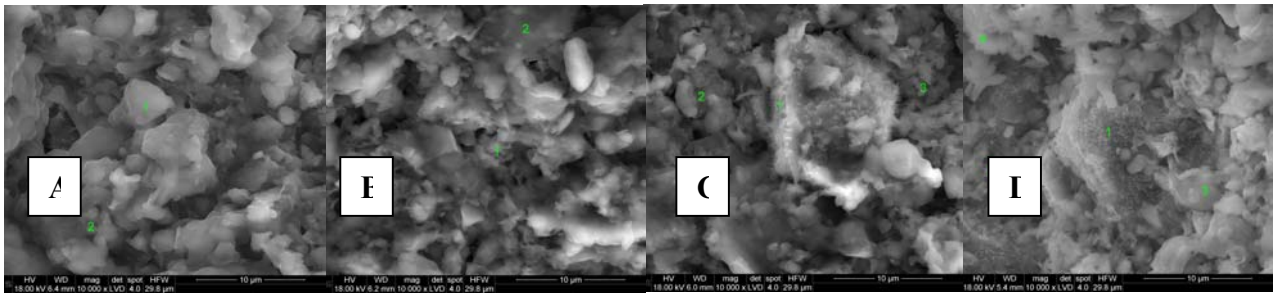


Fig. 5. Krzywe płynięcia zawiesin uszczelniających sporządzonych z surowca smektytowo-kaolinitowego (A), surowca smektytowo-illitowego (B), surowca illitowo-smektytowego (C) oraz surowca kaolinitowego (D).

2.2. *Obserwacje mikroskopowe*

Analizę mikroskopową przeprowadzono dla dwóch etapów. Pierwszy etap obejmował obserwację jednego wytypowanego składu spoiwa hydroizolacyjnego na bazie surowca smektytowo-kaolinitowego. Analizę prowadzono odpowiednio po: 15, 30, 60 i 120 minutach od sporządzenia. Dla każdej próbki wykonano mikrofotografię SEM (Rys. 6).

Drugi etap obejmował obserwacje dwóch wytypowanych, stwardniałych spoiw hydroizolacyjnych różniących się udziałem cementu sporządzonych również na bazie surowca smektytowo-kaolinitowego ze stałym dodatkiem szkła modyfikatora. Dla każdej z nich przeprowadzono badania po odpowiednio: 3, 7, 14, 28 i 150 dniach dojrzewania. Dla każdej próbki wykonano mikrofotografie SEM (Rys. 7).



Rys. 6. Mikrofotografie świeżych próbek zaczynów iłowo-cementowych po 15 (A), 30 (B), 60 (C) i 120 (D) minutach od sporządzenia.

Na zdjęciu wykonanego 15 minut po sporządzeniu zaczynu (Rys. 6A) nie zaobserwowano produktów hydratacji. Daje się jednak zauważyć wyraźna aglomeracja ziaren. Próbka zaczynu jest jednolita w całej objętości. Po 30 minutach od sporządzenia zaczynu (Rys. 6B) sporadycznie pojawiają się pierwsze formy krystaliczne. Po 60 minutach (Rys. 6C) krystality występują częściej i są lepiej wykształcone. Zaczynają łączyć się z sąsiadującymi z nimi ziarnami minerałów ilastych. Po 120 minutach (Rys. 6D) widoczny jest dalszy rozrost krystalitów, są one już rozłożone równomiernie.

Na zdjęciach wykonanych po trzech dniach dojrzewania (Rys.7A), widoczne są ziarna minerałów ilastych połączonych formującą się fazą CSH. Na tym etapie obserwuje się spoiwo jednorodne a formujące się produkty hydratacji rozłożone równomiernie. W próbce siedmiodniowej (Rys.7B) widoczny jest silny rozrost produktów hydratacji cementu. Ziarna minerałów ilastych poprzerastane są wydłużonymi formami fazy CSH. Prawdopodobnie świadczy to o przereagowaniu etryngitu w fazę CSH.

W spoiwie po 14 dniach (Rys. 7C) obserwuje się zagęszczenie struktury. Następuje rozrost krystalicznych form fazy CSH, które spajają ziarna minerałów ilastych i ewentualnie kwarcu. Sugeruje to koagulująco-krystaliczny mechanizm sieciowania. Po 28 dniach dojrzewania (Rys. 7D) tworzywo spoiwa wygląda podobnie jak po 14 dniach dojrzewania. Widoczne jest jednak lepsze przereagowanie cementu. Obserwacje próbki 150 dniowej (Rys. 7E) wskazują, że struktura już nie ulega większym zmianom. Charakterystyczne jest równomierne rozłożenie fazy CSH w całej próbce.

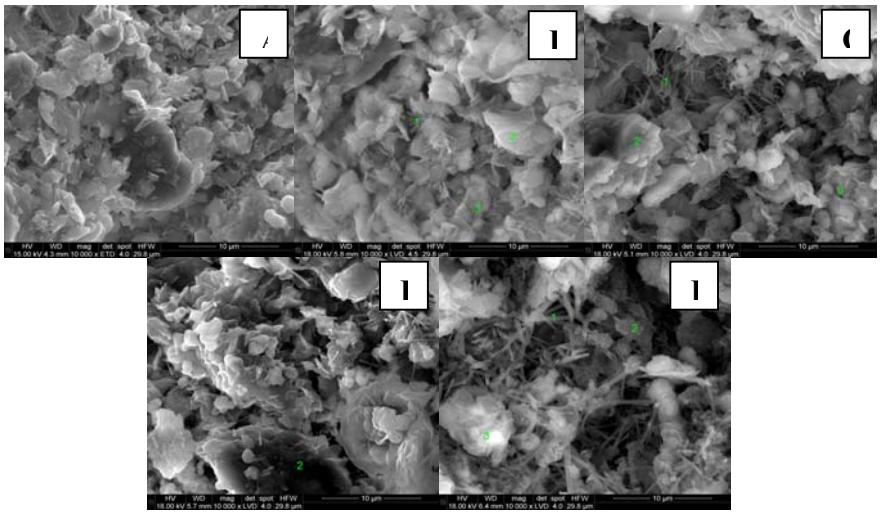


Fig. 7. Mikrofotografie próbek spoiw iłowo-cementowych po 3 (A), 7 (B), 14 (C), 28 (D) i 150 (E) dniach dojrzewania.

2.3. *Pomiary współczynnika filtracji*

Współczynnik filtracji wyznaczono za pomocą prasy filtracyjnej i sprzężonej z nią wagi. Na skutek przyłożonego ciśnienia w komorze prasy filtracyjnej dochodzi do ustalenia się ciągłego przepływu wody przez badaną próbkę. Masowy przepływ jest mierzony przy pomocy wagi elektronicznej WPS 720/C/2 firmy Radwag sprzężonej z komputerem. Program komputerowy odczytuje wskazania wagi, w definiowanych przedziałach czasowych. Wartość współczynnika filtracji wyznaczono za pomocą równania Darcy'ego (1).

Badania przeprowadzono na spoiwach uszczelniających sporządzonych z udziałem wytypowanej zawiesiny bazowej zawierającej surowiec smektytowo-kaolinitowy. Sporządzono spoiwa o zmiennym udziale cementu, gęstości zawiesiny bazowej oraz kodyfikatora. Badaniu poddano próbki spoiwa po 28 dniowym okresie dojrzewania. Pomiary wykazały bardzo wyraźny

wpływ zmian składu mineralnego badanych spoiw, na współczynnik filtracji zawiesin uszczelniających. Ogólnie zmiany ilości poszczególnych składników, przekładają się na istotne różnice we właściwościach filtracyjnych.

Tab. 1. Wartości współczynnika filtracji.

Symbol próbki	Współczynnik filtracji k_T [m/s]	Współczynnik filtracji k_0 [m/s]
C1	$1{,}5 \pm 0{,}8 \cdot 10^{-7}$	$1{,}2 \pm 0{,}6 \cdot 10^{-7}$
C2	$6{,}1 \pm 0{,}7 \cdot 10^{-9}$	$4{,}7 \pm 0{,}5 \cdot 10^{-9}$
C3	$4{,}1 \pm 0{,}6 \cdot 10^{-9}$	$3{,}2 \pm 0{,}5 \cdot 10^{-9}$
C4	$4{,}0 \pm 0{,}9 \cdot 10^{-10}$	$3{,}1 \pm 0{,}7 \cdot 10^{-10}$
C5	$2{,}2 \pm 1 \cdot 10^{-11}$	$1{,}7 \pm 8 \cdot 10^{-11}$
G1	$1{,}2 \pm 0{,}5 \cdot 10^{-8}$	$0{,}9 \pm 0{,}4 \cdot 10^{-8}$
G2	$1{,}3 \pm 0{,}6 \cdot 10^{-9}$	$1{,}0 \pm 0{,}5 \cdot 10^{-9}$
G3	$5{,}9 \pm 0{,}8 \cdot 10^{-10}$	$4{,}5 \pm 0{,}6 \cdot 10^{-10}$
G4	$< 1 \cdot 10^{-11}$	-
M1	$8{,}2 \pm 0{,}4 \cdot 10^{-9}$	$6{,}3 \pm 0{,}3 \cdot 10^{-9}$
M2	$4{,}1 \pm 0{,}5 \cdot 10^{-9}$	$3{,}2 \pm 0{,}4 \cdot 10^{-9}$
M3	$2{,}5 \pm 0{,}8 \cdot 10^{-10}$	$1{,}9 \pm 0{,}6 \cdot 10^{-10}$
M4	$< 1 \cdot 10^{-11}$	-

$$k = \frac{Ql}{\Delta hF} \quad (1)$$

gdzie:

k – współczynnik filtracji [m/s]
Q – przepływ [cm^3/s]
Δh – różnica wysokości słupów wody na końcach drogi l [cm]
l – droga filtracji [cm]
F – przekrój w którym zachodzi filtracja [cm^2]

Już niewielkie zmiany udziału cementu powodują zmianę współczynnika filtracji spoiw o 2 rzędy wielkości. Równie wyraźne są zmiany współczynnika filtracji w funkcji gęstości zawiesiny bazowej. Przy zmianach gęstości zawiesiny bazowej o ok. 0,07g/cm^3 wartość współczynnika filtracji zmienia się o dwa rzędy wielkości. Badania próbek serii trzeciej, gdzie zmienny był udział modyfikatora, wykazały, że zmiany zawartości modyfikatora (szkła wodnego) w zakresie od 0 do 1%, wywołują zmiany współczynnika filtracji o rząd wielkości i kształtują się na poziomie od 8,2 ± 0,4 x 10^{-9} m/s zaś dla próbek bez modyfikatora do 2,5 ± 0,8 x 10^{-10} m/s. W przypadku spoiw zawierających większy dodatek szkła wodnego, wartości współczynnika filtracji mieszczą się poza zakresem pomiarowym.

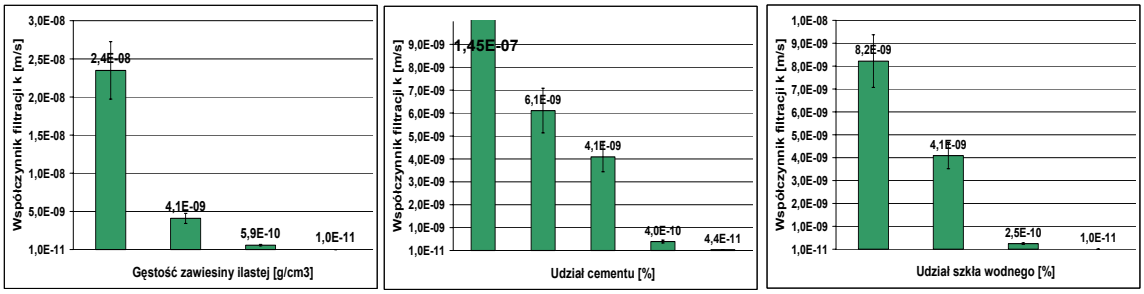


Fig. 8. Wpływ zmian składu spoiw iłowo-cementowych na wartości współczynnika filtracji

2.4. *Wytrzymałość mechaniczna*

Pomiary wytrzymałości mechanicznej na ściskanie przeprowadzono na próbkach walcowych o wymiarach 50x50 mm po 28 dniowym okresie dojrzewania. Badania wykazały sukcesywny wzrost wytrzymałości mechanicznej na ściskanie w miarę zwiększania ilości cementu w spoiwie. Wzrost wytrzymałości mechanicznej na ściskanie widoczny jest również przy zwiększaniu gęstości zawiesiny ilastej (mniejszy udział wody). W tym przypadku wytrzymałość mechaniczna na ściskanie zmienia się od 500 kPa do 1,2 MPa. Zmiana gęstości zawiesin bazowych o 0,05 g/cm^3 powoduje praktycznie podwojenie wytrzymałości mechanicznej spoiw. Dodatek zawartości szkła wodnego w spoiwie ma mniejszy wpływ właściwości mechaniczne. W zależności od zawartości szkła wodnego wytrzymałości mechaniczne na ściskanie wahają się na poziomie od 468 do 606 kPa.

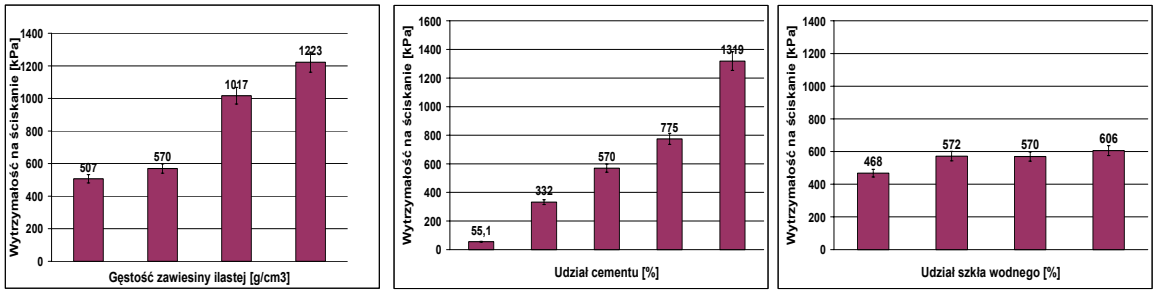


Fig. 9. Wpływ zmian składu spoiw iłowo-cementowych na ich wytrzymałość mechaniczną.

3. Podsumowanie wyników

Iłowo-cementowe spoiwa uszczelniające stanowią układy lepkoplastyczne dzięki temu nie naruszają układu otaczającego ich środowiska.. Jest to ich cecha charakterystyczna w całym zakresie wiązania (1 - 28 dni). Wydłużony czas powstawania struktury, nie pozwala na wymywanie spoiw ze szczelin i krasowych połączeń podziemnych wód, a zawarte drobnodyspersyjne frakcje iłowe zapewniają wysoką szczelność. Przeprowadzone badania wykazały, że powstawanie struktury wewnętrznej spoiw można programować zarówno ilością cementu, jak i dodatkiem drobnodyspersyjnych minerałów ilastych oraz ilością modyfikatorów procesu hydratacji.

Kinetyka koagulacyjno-krystalicznego sieciowania oraz najwyższa żądana wytrzymałość mechaniczna określa zakres zmienności zawartości gliny i cementu w zaczynie uszczelniającym w czasie. Odwracalna struktura tiksotropowa zawiesin uszczelniających prawdopodobnie związana jest bezpośrednio z warstwą solwatacyjną wokół rozproszonych ziaren minerałów ilastych w wyniku wymiany jonowej, jaka w tych warunkach zachodzi (mechanizmy upłynniania). Z drugiej strony warstwa ta spowalnia kinetykę hydratacji cementu, ponieważ znajdująca się w niej woda (o innych właściwościach fizykochemicznych) oraz kationy kompensujące, prawdopodobnie trudniej wchodzą w reakcje. Reakcje hydratacji cementu prowadzą do powstawania struktury nieodwracalnej. W rezultacie powstaje wewnętrzna struktura pseudotiksotropowa o ograniczonej odwracalności. Badania reologiczne wykazały, że ścinania w zakresie 5-10 s^{-1} mogą znacząco przyspieszyć powstawanie struktury wewnętrznej. Fakt ten ma ważne znaczenie praktyczne, ponieważ określa warunki transportu zaczynów uszczelniających. Należy przy tym mieć na uwadze, że wszelkie mieszania, pompowania itp., w których występuje ścinanie, burzą strukturę wewnętrzną, rozrzedzają układ, i przez to spowalniają odbudowę zniszczonej części struktury odwracalnej.

Cechą zasadniczą badanych spoiw iłowo-cementowych jest ograniczanie przenikania wody. Jeżeli wartości współczynnika filtracji tych materiałów kształtują się poniżej wartości $1 \cdot 10^{-8}$ m/s, mogą być traktowane jako bariery nieprzepuszczalne. Właściwość ta, w powiązaniu z wytrzymałością mechaniczną (wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w zakresie 0,5 do 1,5MPa), determinuje przydatność takich materiałów w sytuacjach podatnych na deformację bez utraty wodoszczelności. W tych przypadkach następuje plastyczne odkształcanie bariery bez utraty ciągłości. Właściwości te można programować.

BIBLIOGRAFIA

[1] Pazdro Z., Kozerski B., Hydrogeologia ogólna, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1990

[2] Herzih J., Szczepańska J., Zastosowanie metody flow-pump do badań współczynnika filtracji w gruntach słabo przepuszczalnych, Współczesne problemy Hydrogeologii, t. VII, Kraków-Krynica, Wyd. AGH, Kraków 1995

[3] Ł. Wójcik, P. Izak, R. Kuś, "Wykorzystanie surowców zawierających minerały ilaste w przegrodach hydroizolacyjnych", Ceramika, 103/2, 1181-1188, 2008.

[4] Ł. Wójcik, P. Izak, R. Kuś, „*Wpływ zmian składu na właściwości spoiw iłowo-cementowych",* Materiały Ceramiczne , Polskie Towarzystwo Ceramiczne, Kraków 2009 t. 61 nr 1 s. 27–30

[5] Ł. Wójcik, P. Izak, A. Stempkowska, „*Pseudotiksotropowe właściwości zawiesin iłowo-cementowych",* Materiały Ceramiczne , Polskie Towarzystwo Ceramiczne, Kraków 2011 t. 6 nr 2 s. 278–282