

MARZENA KURPIŃSKA¹⁾

WŁAŚCIWOŚCI BETONU IMPREGNOWANEGO KOMPOZYCJAMI EPOKSYDOWYMI²⁾

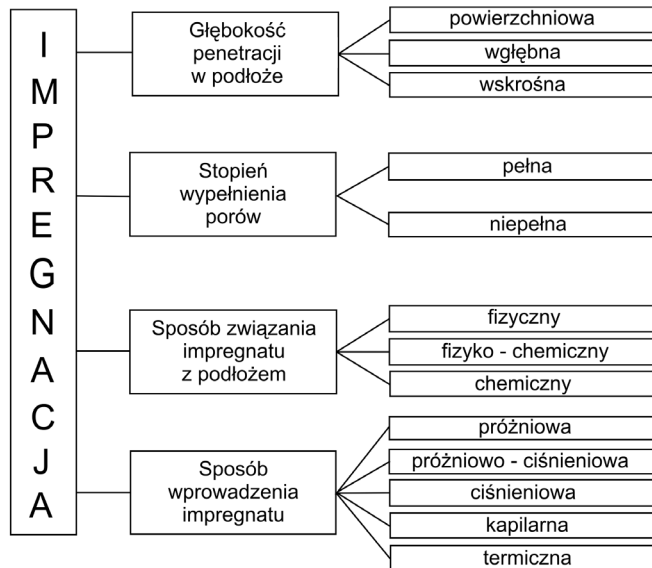
STRESZCZENIE. Zabezpieczając powierzchnię betonu przez impregnację w obiektach drogowych i mostowych można w znacznym stopniu ograniczyć proces przenikania gazów i cieczy, a tym samym zapobiegać destrukcji. Przedmiotem artykułu jest wpływ własności materiałów impregnacyjnych na właściwości i trwałość betonu. Szczególną uwagę poświęcono projektowaniu składu kompozycji żywicznych. Sporządzono 160 kompozycji, spośród których wybrano impregnaty na podstawie następujących kryteriów: lepkość, gęstość, głębokość wnikania, czas żelowania. Aby ocenić efektywność nowych środków ochronnych przeprowadzono porównanie własności fizycznych próbek betonów impregnowanych oraz nieimpregnowanych, poddanych działaniu środowiska agresywnego.

1. WSTĘP

Impregnacja stosowana jako zabezpieczenie warstwy przypowierzchniowej, może być stosowana w celu poprawy właściwości fizyko-mechanicznych betonu takich jak: zabezpieczenie przed wnikaniem wody przez hydrofobizację, podwyższenie mrozo-odporności, obniżenie ścieralności, podwyższenie odporności na udarność, zapobieganie pyleniu [1]. Stosując zabieg impregnacji możemy także, zmienić estetykę powierzchni betonu. Metody impregnacji można podzielić według czterech kryteriów (rys. 1).

¹⁾ dr inż. – Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Gdańskiej

²⁾ artykuł na podstawie pracy doktorskiej autorki



Rys. 1. Metody impregnacji [1]

Fig. 1. Methods of the impregnation [1]

Pod względem głębokości impregnacji możemy wyróżnić impregnację powierzchniową, kiedy impregnat wnika na głębokość do 4 mm. Może ona stanowić warstwę zaporową dla medium agresywnego oraz wpływać w istotnym stopniu na zwiększenie trwałości elementu. Po przekroczeniu przez impregnat strefy nasycenia grubości 4 mm, można traktować impregnację jako wglębna, a w skrajnym przypadku wskrośna, a więc obejmującą cały przekrój elementu [2, 3]. Biorąc pod uwagę stopień wypełnienia porów, występuje: impregnacja pełna, która powoduje całkowite wypełnienie porów oraz impregnacja niepełna, kiedy pory pozostają tylko wyścielone impregnatem. Beton można impregnować zarówno substancjami organicznymi, jak i nieorganicznymi, które wchodzi w reakcję ze składnikami spoiwa cementowego. Jest to tzw. impregnacja chemiczna. Jako impregnaty stosuje się w niej roztwory wodne związków, które wiążą wolne wapno (fluorokrzemiany, kwas szczawiowy, kwas winowy), substancję najbardziej wrażliwą na różne rodzaje agresji chemicznej. Impregnacja fizyczna jest to nasycanie betonu substancjami takimi jak: polimery, bitumy, woski, kompozycje epoksydowe, epoksydowo-smołowe lub smołowe. Wiele z tych metod nadaje się do impregnowania wyłącznie elementów prefabrykowanych. Ograniczona możliwość powszechnego stosowania niektórych z wyżej wymienionych metod, w praktyce wynika z trudności wprowadzenia impregnatu w beton na odpowiednią głębokość. Najczęściej stosowanymi w praktyce metodami są: impregnacja kapilarna i impregnacja termiczna [4 - 6].

2. DANE OGÓLNE DOTYCZĄCE METOD NAPRAW I OCHRONY BETONU

Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN), działając na podstawie Mandatu M/128-EN Komisji Europejskiej, opracował w ciągu ostatnich piętnastu lat zbiór dziesięciu norm pod ogólnym tytułem EN 1504: Products and systems for the protection and repair of concrete structure. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity („Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji z betonu. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności”). Jako ostatnia została wprowadzona część 9: Ogólne zasady dotyczące stosowania wyrobów i systemów. W 1997 r. opublikowano ENV 1504-9 jako „normę do tymczasowego stosowania” [7, 8]. Normy z serii EN 1504 są wprowadzone do stosowania w Polsce (tabl. 1) przez Polski Komitet Normalizacyjny [9, 10].

Tablica 1. Normy Europejskie z serii PN-EN 1504 [9]
Table 1. European norms series PN-EN 1504 [9]

Numer normy EN	Tytuł	Rok wprowadzenia do stosowania w Polsce
1504-1	Definicje, wymagania, kontrola jakości i ocena zgodności	2000, nowelizacja 2006
1504-2	Systemy ochrony powierzchniowej betonu	2006
1504-3	Naprawy konstrukcyjne i niekonstrukcyjne	2006
1504-4	Łączenie konstrukcyjne	2006
1504-5	Kotwienie stalowych prętów zbrojeniowych	2007
1504-7	Ochrona zbrojenia przed korozją	2007
1504-8	Sterowanie jakością i ocena zgodności	2006
1504-9	Ogólne zasady stosowania wyrobów i systemów	2010
1504-10	Stosowanie wyrobów i systemów na placu budowy oraz kontrola jakości prac	2005, nowelizacja 2006

W tablicy 2 na podstawie [10] przedstawiono normowe zasady i metody napraw betonu. Metody naprawy i ochrony mogą być stosowane łącznie. Należy jednak uwzględnić możliwość wystąpienia między nimi współdziałania, zarówno korzystnego jak i negatywnego. W przypadku konstrukcji użytkowanych w środowisku o małej i średniej agresywności chemicznej impregnacja powierzchni betonu może być zabiegiem kończącym naprawę [11].

Ogromny wpływ na skuteczność przeprowadzanych napraw lub zabezpieczeń powierzchniowych betonu ma odpowiednie przygotowanie i postępowanie podczas robót, z uwzględnieniem rodzaju środowiska agresywnego, mającego wpływ na tę część elementu betonowego [12]. W normie PN-EN 1504-10 [13] podano zasady, jakimi należy się kierować podczas wykonywania prac naprawczych. Prace te, uzależnione od zakresu prowadzonych robót, mogą obejmować: oczyszczenie powierzchni betonowej, ewentualne uszorstkowanie podłoża, a w przypadku zniszczonego korozyjnie podłoża – usunięcie uszkodzonych lub skażonych (np. chlorkami)



fragmentów betonu [12]. Szczególnie w przypadku przygotowania zniszczonego korozyjnie betonu norma PN-EN 1504-10 [13] wskazuje na zasady, jakich należy przestrzegać przy usuwaniu betonu. Zakres usunięcia betonu powinien być ograniczony do niezbędnego minimum. Usunięcie fragmentów betonu nie powinno wpływać negatywnie na prace naprawianej konstrukcji. Grubość usuwanej warstwy betonu powinna być dostosowana do rodzaju metody naprawy lub ochrony powierzchniowej i stanu podłoża. Powinno się przy tym uwzględnić odporność betonu na wnikanie szkodliwych czynników takich jak gazy i ciecze, a także określić: rodzaj i stężenie szkodliwych substancji, znajdujących się w betonie przed naprawą, głębokość skażenia, głębokość karbonatyzacji, procesy korozyjne zachodzące na powierzchni zbrojenia. Należy wykonać właściwą grubość otuliny zbrojenia, zapewnić odpowiednią przyczepność warstwy naprawczej do podłoża oraz zabezpieczyć stal przed korozją [12].

Tablica 2. Zasady i metody napraw betonu wg PN-EN 1504-9 [10]

Table 2. Principles and methods of repairs of concrete according to PN-EN 1504-9 [10]

Definicja	Metody
<p>Ochrona przed wnikaniem</p> <p>Ograniczenie lub uniemożliwienie wnikania szkodliwych substancji, np. wody, innych cieczy, par, gazów, czynników chemicznych i biologicznych.</p>	<p>1.1 Impregnacja</p> <p>1.2 Powłoki ochronne</p> <p>1.3 Lokalne scalenie rys (opaski)</p> <p>1.4 Wypełnienie rys</p> <p>1.5 Przekształcenie rys w złącza</p> <p>1.6 Zewnętrzne osłony</p> <p>1.7 Wykładziny</p>
<p>Ograniczenie zawilgocenia</p> <p>Utrzymanie zawilgocenia betonu na dopuszczalnym poziomie</p>	<p>2.1 Hydrofobizacja</p> <p>2.2 Powłoki ochronne</p> <p>2.3 Osłony i okładziny</p> <p>2.4 Ochrona elektrochemiczna; stosowanie różnic potencjałów w elementach betonowych w celu kontroli transportu wody</p>
<p>Odbudowanie elementu</p> <p>Przywrócenie elementowi betonowemu założonego kształtu i funkcji; częściowa wymiana betonu</p>	<p>3.1 Ręczne nakładanie zaprawy naprawczej</p> <p>3.2 Nadłożenie warstwy betonu</p> <p>3.3 Natryskiwanie betonu lub zaprawy</p> <p>3.4 Wymiana elementu</p>
<p>Wzmacnianie konstrukcji</p> <p>Przywrócenie lub zwiększenie nośności elementu konstrukcji</p>	<p>4.1 Uzupełnianie lub wymiana prętów zbrojeniowych lub zewnętrzne zbrojenie</p> <p>4.2 Zabetonowanie prętów w (uprzednio zaformowanych lub wywierconych) otworach w betonie</p> <p>4.3 Doklejanie płyt</p> <p>4.4 Nakład zaprawy lub betonu</p> <p>4.5 Iniekcja rys, pustek i przerw</p> <p>4.6 Wypełnianie rys, pustek i przerw</p> <p>4.7 Spreżanie (struno beton lub kablobeton)</p>



Definicja	Metody
Odporność fizyczna Zwiększenie odporności na oddziaływania fizyczne lub mechaniczne	5.1 Powłoki lub wykładziny ochronne 5.2 Impregnacja
Odporność chemiczna Zwiększenie odporności powierzchni betonu na destrukcję czynnika chemicznego	6.1 Powłoki ochronne 6.2 Impregnacja
Utrzymanie lub przywrócenie stanu pasywnego stali zbrojeniowej	7.1 Zwiększenie grubości otuliny przez dodanie zaprawy lub betonu cementowego 7.2 Wymiana skażonego lub skarbonatyzowanego betonu 7.3 Elektrochemiczna realkalizacja betonu 7.4 Realkalizacja betonu przez dyfuzję 7.5 Elektrochemiczne usunięcie chlorków
Podwyższenie oporności elektrycznej otuliny betonowej	8. Ograniczenie zawartości wilgoci przez obróbkę powierzchniową powłoki lub okładziny
Sterowanie obszarami katodowymi	9. Ograniczenie dostępu tlenu (na katodzie) np. przez powłokę ochronną
Ochrona katodowa	10. Przyłożenia napięcia elektrycznego
Sterowanie obszarami anodowymi Zapobieganie reakcjom anodowym	11.1 Pokrywanie zbrojenia powłoką zawierającą aktywne pigmenty 11.2 Pokrywanie zbrojenia powłoką barierową 11.3 Wprowadzanie inhibitorów korozji do betonu

3. WŁAŚCIWOŚCI ŻYWIC EPOKSYDOWYCH

Żywice epoksydowe wprowadzono jako produkt przemysłowy przed około 45 laty. Wzbudziły duże zainteresowanie ze względu na własności wyróżniające je spośród innych tworzyw sztucznych. Bardzo szybko znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu. Żywice epoksydowe są to lepkie ciecze lub kruche ciała stałe, które w procesie utwardzania przekształcają się wskutek usieciowania w nierozpuszczalne i nietopliwe tworzywa o dużej wytrzymałości mechanicznej, dobrych własnościach elektroizacyjnych i znacznej odporności chemicznej. Związki epoksydowe znane były już w roku 1860, natomiast żywicę epoksydową po raz pierwszy otrzymał dr Castan w 1936 r. [14].



W celu uzyskania wyrobu użytkowego w postaci powłoki, impregnatu, błony lakierowej czy laminatu itp., należy przekształcić żywicę w produkt nietopliwy i nierozpuszczalny przez usieciowanie przestrzenne. Usieciowanie przestrzenne żywic epoksydowych następuje w wyniku reakcji chemicznej grup funkcyjnych z odpowiednio dobranym utwardzaczem czyli środkiem sieciującym. Stosuje się utwardzacze różnego rodzaju do odpowiedniego typu żywic epoksydowych. Bardzo szczegółowo zagadnienie doboru utwardzaczy opisują autorzy pracy [15]. Wybór utwardzacza zależy od warunków utwardzania oraz od wymaganych własności żywicy utwardzonej, a najważniejszym kryterium jest temperatura utwardzania. Utwardzacze do żywic epoksydowych są związkami chemicznymi, które w wyniku reakcji chemicznych powodują przestrzenne usieciowanie żywic, nadając jej cechy kleju, syrciwa lub tworzywa chemoutwardzalnego. Utwardzacze takie jak: pierwszorzędowe i drugorzędowe dwuaminy, wieloaminy alifatyczne i aromatyczne, polimerkaptany zawierające aktywne atomy wodoru reagują tylko z grupami epoksydowymi. Natomiast bezwodniki kwasowe reagują także z grupami wodorotlenowymi, dzięki czemu gęstość usieciowania utwardzonej żywicy jest znacznie większa. Do utwardzania żywic epoksydowych stosuje się także utwardzacze nie zawierające czynnych atomów wodoru, które powodują polimeryzację jonową. Są to kwasy i zasady typu Lewisa, np. fluorek boru i aminy trzeciorzędowe. Utwardzacze stosowane do utwardzania żywic epoksydowych można podzielić na następujące grupy:

- utwardzacze aminowe: aminy alifatyczne, aminy cykloalifatyczne, aminy aromatyczne, addukty amin aromatycznych i alifatycznych oraz ich modyfikacje,
- utwardzacze poliamidowe,
- utwardzacze amidowe,
- utwardzacze bezwodnikowi,
- utwardzacze typu kwasów i zasad Lewisa.

Procesowi utwardzania towarzyszą zmiany własności fizycznych układu żywica – utwardzacz. Reakcje utwardzania są egzotermiczne, wydzielające się ciepło powoduje wzrost temperatury układu i przyspieszenie reakcji między żywicą i utwardzaczem. W niektórych przypadkach, niepożądanemu wzrostowi temperatury można przeciwdziałać przez dodanie do żywicy dużej ilości wypełniacza pochłaniającego wydzielające się ciepło. Po zmieszaniu żywicy z utwardzaczem i ewentualnym ogrzaniu obserwuje się wzrost lepkości układu. W tym okresie następuje łączenie się, niewielkich początkowo, cząsteczek w makrocząsteczki rozgałęzione ale jeszcze nieusieciowane. Po pewnym czasie, lepkość zaczyna wzrastać bardzo szybko, po czym osiąga punkt żelu, następuje zżelowanie. Jest to moment, w którym powstają struktury przestrzennie usieciowane, a żywica z utwardzaczem staje się nietopliwa i częściowo nierozpuszczalna w rozpuszczalnikach organicznych. W praktyce istnieje możliwość zahamowania procesu utwardzania przez ochłodzenie, zanim nastąpi zżelowanie. Użytkuje się wówczas rozpuszczalny i topliwy półprodukt, który nie zlepia się podczas składowania i nadaje się do dalszego przerobu przez utwardzenie w podwyższonej temperaturze, np. w postaci. tzw. preimpregnatu. Po przekroczeniu punktu żelu, powstaje początkowo miękki żel o małej wytrzymałości mechanicznej, który stopniowo

ulega wzmocnieniu. Przy dalszym wzroście gęstości usieciowania tworzywo przechodzi w szkliste ciało stałe o zwiększającej się twardości. W wyniku reakcji utwardzania następuje kontrakcja, czyli zmiana objętości mieszaniny. Jest to tzw. chemiczny skurcz utwardzania. Na ogół dołącza się do niego skurcz fizyczny utwardzania, spowodowany obniżeniem temperatury mieszaniny od temperatury utwardzania do temperatury otoczenia. Budowa chemiczna utwardzacza ma decydujący wpływ na własności wytrzymałościowe utwardzonych żywic epoksydowych [16].

Technika przetwórcza żywic epoksydowych wymaga często stosowania kompozycji o małej lepkości. Niezbędne jest to np. przy nakładaniu powłok ochronnych i impregnatów metodą natryskową lub pędzlem. W celu obniżenia lepkości kompozycji utwardzanych na zimno, wprowadza się do nich tzw. rozcieńczalniki. Rozcieńczalniki można podzielić ze względu na ich budowę i udział w reakcjach utwardzania na dwie grupy:

1. rozcieńczalniki nieaktywne: nie mają grup funkcyjnych zdolnych do reakcji z żywicą podstawową lub utwardzaczem i nie biorące udziału w procesie utwardzania, pozostające w utwardzonym tworzywie chemicznie niezwiązane;
2. rozcieńczalniki aktywne: wiążą się chemicznie w procesie utwardzania w budując się w przestrzenną strukturę żelu. Ze względu na rodzaj grup funkcyjnych i sposób wiązania się w reakcjach utwardzania podzielić je można na trzy grupy.

Rozcieńczalniki pozostające w żywicy po utwardzeniu wywierają wpływ na własności utwardzonego tworzywa. Ilość wprowadzonego do żywicy rozcieńczalnika musi być tak dobrana, aby przygotowane kompozycje miały w temperaturze pokojowej dobre własności mechaniczne przy niewielkim obniżeniu temperatury odkształcenia cieplnego [17].

4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

4.1. CEL I ZAKRES BADAŃ

Podstawowym celem podjętych badań było określenie efektywności przypowierzchniowego zabezpieczenia betonów przed wnikaniem cieczy organicznych. Jako miarę efektywności zabezpieczenia przyjęto głębokość wnikania impregnatu w beton, stopień wypełnienia porów, a także lepkość i czas żelowania kompozycji. Badania efektywności zabezpieczenia przeprowadzono biorąc pod uwagę:

- skład impregnatu: rodzaj żywicy, rodzaj i ilość utwardzacza, rozcieńczalnika, lepkość kompozytu,
- parametry betonu: składu mieszanki betonowej (ilość cementu, współczynnik w/c), porowatość,
- warunki przeprowadzenia impregnacji: metoda aplikacji, temperatura betonu, temperatura otoczenia, temperatura impregnatu, wilgotność podłoża.



Sporządzono 160 kompozycji impregacyjnych na bazie żywic epoksydowych: EP 5, EP 6, EP 560, EP 607 z utwardzaczami: Akfanil 50, ET, Z-1, KT z dodatkiem plastyfikatora w postaci oleju syntetycznego oraz rozcieńczalników: toluenu, ksylenu.

Wykonano badania następujących właściwości sporządzonych kompozycji: gęstości, lepkości, czasu żelowania. Wykonano impregnację betonu C(0,65) [18]. Przeprowadzono analizę matematyczną wnikania cieczy w podłoże porowate. Wyniki analizy zostały przedstawione w [18]. Następnie wykonano symulację komputerową głębokości wnikania impregnatu w podłoże porowate, uwzględniając skład kompozycji i wykorzystując sztuczną sieć neuronową. Do kolejnego etapu badań wytypowano 13 reprezentatywnych impregnatów, spełniających określone kryteria. Zastosowano betony o różnych wskaźnikach wodno-cementowych od 0,65 do 0,4. Do ostatniego etapu badań wytypowano 4 impregnaty z 13, które w najwyższym stopniu zabezpieczyły powierzchnię betonu przed wnikaniem cieczy (woda i olej). Dodatkowo porównano dwa sposoby zabezpieczenia betonu: przez impregnację powierzchniową oraz wewnętrzne uszczelnienie struktury betonu dodatkiem mikrokrzemionki.

4.2. OPIS IMPREGNATÓW ORAZ WYNIKI BADAŃ ICH WŁAŚCIWOŚCI

Sporządzono mieszanki impregnacyjne składające się z różnego rodzaju żywic epoksydowych (EP 5, EP 560, EP 6, EP 607), utwardzacza, plastyfikatora i rozcieńczalnika. Zbadano lepkość, gęstość kompozycji za pomocą lepkościomierza Brookfielda oraz głębokość wnikania kompozycji impregnacyjnej. Wszystkie kompozycje utwardzono w temperaturze około $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Skład badanych kompozycji żywicznych przedstawiono w tabelicy 3. Do określenia głębokości wnikania w powierzchnię betonu C(0,65) o wskaźniku wodno-cementowym równym 0,65 przygotowano próbki sześciennie o boku 10 cm. Próbki przez 28 dni przechowywane były w pomieszczeniu o wilgotności około 90%. Górną powierzchnię kostki pokrywano dwukrotnie impregnatem. Po połączeniu składników impregnatu określono: czas żelowania, lepkość, gęstość, czas przydatności impregnatu do użycia oraz czas schnięcia w temperaturze $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Kompozycję nanoszono na powierzchnię betonu za pomocą pędzla. Do impregnacji używano zawsze tę samą ilość mieszanki impregnującej. Badanie głębokości wnikania impregnatu sprawdzono po 2 dobach od nałożenia impregnatu na powierzchnię kostki.

W tabelicy 3 przedstawiono przykładowe wyniki badań kompozycji impregnującej składającej się z: EP 607 – żywica epoksydowa, toluen – rozcieńczalnik, Akfanil 50 – utwardzacz, olej syntetyczny – plastyfikator. Rozpatrywany przedział zmiany poszczególnych składników wynosił od 0% do 50% udziału wagowego w mieszance impregnującej.

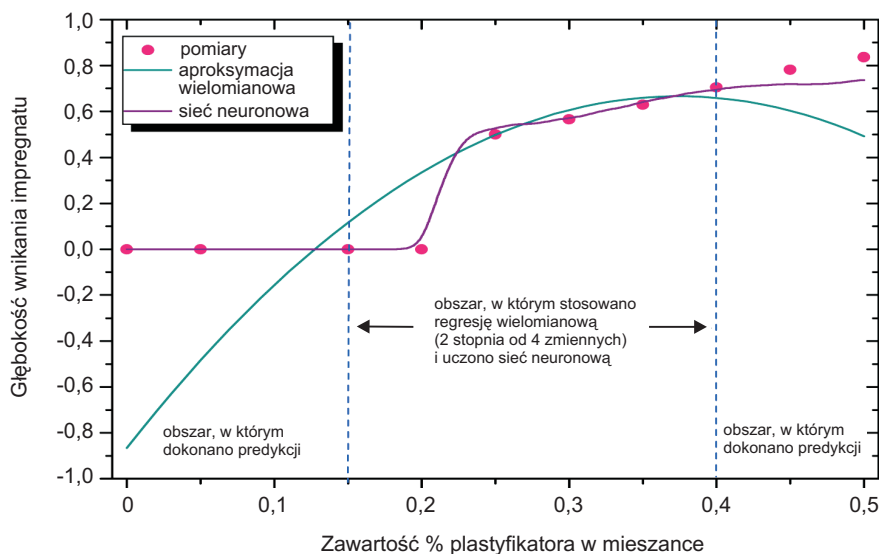


Tablica 3. Skład kompozycji impregnacyjnych oraz wyniki pomiaru głębokości wnikania
 Table 3. Waterproofing compositions and depth of penetration

Składniki i wynik pomiaru	Proporcje składników w kolejnych kompozycjach													
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50				
Olej	0,317	0,30	0,283	0,267	0,25	0,233	0,216	0,20	0,183	0,166				
Toluen	0,317	0,30	0,283	0,267	0,25	0,233	0,216	0,20	0,183	0,166				
Epidian 607	0,317	0,30	0,283	0,267	0,25	0,233	0,216	0,20	0,183	0,166				
Akfamil 50	0	0	0	0	0,5	0,57	0,63	0,71	0,78	0,84				
Głębokość wnikania [mm]	0,317	0,30	0,283	0,267	0,25	0,233	0,216	0,20	0,183	0,166				
Toluen	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50				
Epidian 607	0,317	0,30	0,283	0,267	0,25	0,233	0,216	0,20	0,183	0,166				
Akfamil 50	0,317	0,30	0,283	0,267	0,25	0,233	0,216	0,20	0,183	0,166				
Głębokość wnikania [mm]	0	0	0	0	0,52	0,62	0,68	0,78	0,80	0,83				
Olej	0,317	0,30	0,283	0,267	0,25	0,233	0,216	0,20	0,183	0,166				
Toluen	0,317	0,30	0,283	0,267	0,25	0,233	0,216	0,20	0,183	0,166				
Epidian 607	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50				
Akfamil 50	0,317	0,30	0,283	0,267	0,25	0,233	0,216	0,20	0,183	0,166				
Głębokość wnikania [mm]	0,78	0,74	0,71	0,68	0,52	0,33	0	0	0	0				
Olej	0,317	0,30	0,283	0,267	0,25	0,233	0,216	0,20	0,183	0,166				
Toluen	0,317	0,30	0,283	0,267	0,25	0,233	0,216	0,20	0,183	0,166				
Epidian 607	0,317	0,30	0,283	0,267	0,25	0,233	0,216	0,20	0,183	0,166				
Akfamil 50	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50				
Głębokość wnikania [mm]	0,73	0,70	0,66	0,62	0,55	0,44	0,33	0	0	0				

4.3. WYKORZYSTANIE SZTUCZNEJ SIECI NEURONOWEJ

W celu prawidłowego opisanie zjawiska uczono sztuczną sieć neuronową i przeprowadzono regresję nieliniową dla danych pomiarowych usuwając część skrajnych punktów pomiarowych. Zastosowano program do tworzenia i nauki sieci neuronowych – SNNSv4.2 [19 - 21]. Przybliżanie wielomianem 2 stopnia daje bardzo duże odchylenie na brzegach w przeciwieństwie do sieci neuronowej. Zwiększając stopień wielomianu na każdą zmienną, uzyskano lepsze dopasowanie, ale na brzegach powstałyby jeszcze większe oscylacje – znany fakt z teorii wielomianów. W procesie przybliżania wielomianem liczba zmiennych niezależnych jest duża i rośnie wraz ze wzrostem jego stopnia np. dla stopnia 3 - 31 zmiennych. Powoduje to komplikacje obliczeniowe i zmniejsza wiarygodność uzyskanych przybliżeń. Sieć neuronowa poza obszarem uczenia posiada lepsze zdolności predykcji. Z uwagi na ten fakt i mniejszą wiarygodność drugiej metody symulacja przy pomocy sieci neuronowej jest w stanie lepiej odzwierciedlić badane zjawisko. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy wykres predykcji wielomianowej i sieci neuronowej oraz rzeczywiste punkty pomiarowe z całego badanego obszaru. Przedstawiono wpływ ilości plastyfikatora, jako jednego ze składników na predykcję głębokości wnikania impregnatu. Zastosowano bezwymiarową miarę głębokości wnikania z przedziału $\langle 0,1 \rangle$. W celu transformacji do wartości rzeczywistych użyto wzoru $g = \frac{y}{1-y}$, gdzie: g – głębokość rzeczywista (symulowana), y – głębokość wnikania impregnatu $\langle 0,1 \rangle$. Pozostałe wyniki analizy zostały przedstawione w [21].



Rys. 2. Zależność głębokości wnikania impregnatu od % zawartości plastyfikatora
 Fig. 2. Relation of the depth of penetrating of the impregnant from % contents plasticizers



Symulacja za pomocą sztucznej sieci neuronowej dała zadowalające przybliżenie badanego zagadnienia – bardzo dobrze odtworzone zostały nieliniowe zależności między zawartością składników i głębokością wnikania impregnatu w beton. Predykcja wyników poza obszarem uczenia sieci okazała się dużo lepsza niż dla przybliżenia wielomianem. Proces uczenia sieci, możliwości generalizacji i większa poprawność wyników przemawiają za wybraną metodą.

4.4. OPIS BADAŃ BETONU IMPREGNOWANEGO

Do badań wytypowano 13 kompozycji żywicznych, kierując się następującymi kryteriami:

- głębokość wnikania impregnatu – min. 1 mm,
- czas żelowania w temperaturze $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ około 150 - 200 min,
- czas przydatności do użycia: min. 25 min,
- czas schnięcia: 300 - 540 min,
- lepkość w temperaturze $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$: 110 - 335 mPa·s.

Skład impregnatów podano w tablicy 4.

Działanie impregnatów określono porównując próbki impregnowane z próbkami nieimpregnowanymi. Przygotowano cztery rodzaje betonowych próbek po 3 sztuki dla każdego rodzaju impregnatu oraz po 3 sztuki z każdego rodzaju betonu – próbki porównawcze nieimpregnowane. Skład betonu opisano w tablicy 5, przyjmując oznaczenie betonu: C(0,65), C(0,55), C(0,45), C(0,4), w którym liczby w nawiasie oznaczają wskaźnik wodno-cementowy. Przeprowadzono badanie następujących właściwości technicznych betonu: wytrzymałość na ściskanie, podciąganie kapilarne, nasiąkliwość, głębokość wnikania wody i oleju, mrozoodporność. Określono wilgotność próbek w stanie powietrzno-suchym, która wynosiła 1,5% - 2%.

Badania podciągania kapilarnego wody przeprowadzono na 3 próbkach $10 \times 10 \times 10$ cm dla każdej klasy betonu i dla każdego impregnatu. Próbki zaimpregnowano dwukrotnie za pomocą pędzla z 5 stron. Po dwóch dobach od wykonania impregnacji, próbki ułożono w pojemniku na ruszcie z wodą, tak aby były zagłębione w wodzie na 2 cm. Górna powierzchnia próbki nie była zaimpregnowana. Próbki pozostawały tak zanurzone w wodzie przez 14 dni.

Celem badania wnikania wody było określenie stopnia zabezpieczenia powierzchni betonu przed działaniem wody. Badanie przeprowadzono na kostkach $10 \times 10 \times 10$ cm zaimpregnowanych dwukrotnie za pomocą pędzla, na górnej powierzchni próbki, do której przymocowana była rurka szklana o wysokości 40 cm i średnicy 2 cm wypełniona wodą (rys. 3).



Tablica 4. Skład impregnatów
Table 4. Composition of impregnants

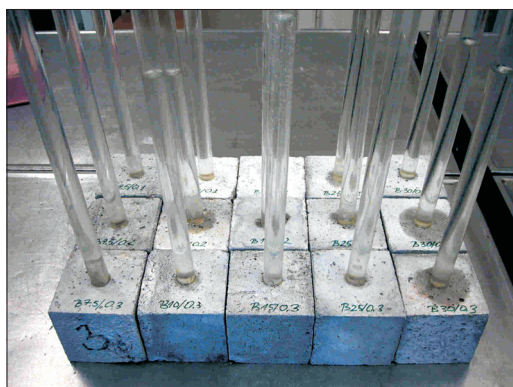
Oznaczenie	Składniki kompozycji		Lepkość 50 RPM
1	Żywica	EP 6	187cP
	Rozpuszczalnik	toluen	
	Olej	Hydrol 40	
	Utwardzacz	KT	
2	Żywica	EP 6	160cP
	Rozpuszczalnik	toluen	
	Olej	Hydrol 40	
	Utwardzacz	KT	
3	Żywica	EP 6	205cP
	Rozpuszczalnik	toluen	
	Olej	Hydrol 40	
	Utwardzacz	KT	
4	Żywica	EP 6	335cP
	Rozpuszczalnik	toluen	
	Olej	Hydrol 40	
	Utwardzacz	KT	
5	Żywica	EP 6	305cP
	Rozpuszczalnik	toluen	
	Olej	Hydrol 40	
	Utwardzacz	KT	
6	Żywica	EP 6	206cP
	Rozpuszczalnik	toluen	
	Olej	Hydrol 40	
	Utwardzacz	KT	
7	Żywica	EP 6	254cP
	Rozpuszczalnik	toluen	
	Olej	Hydrol 40	
	Utwardzacz	KT	
8	Żywica	EP 6	315cP
	Rozpuszczalnik	toluen	
	Olej	Hydrol 40	
	Utwardzacz	KT	
9	Żywica	EP 6	280cP
	Rozpuszczalnik	toluen	
	Olej	Hydrol 40	
	Utwardzacz	KT	



Oznaczenie	Składniki kompozycji		Lepkość 50 RPM
10	Żywica	EP 6	184cP
	Rozpuszczalnik	toluen	
	Olej	Hydrol 40	
	Utwardzacz	KT	
11	Żywica	EP 6	296cP
	Rozpuszczalnik	toluen	
	Olej	Hydrol 40	
	Utwardzacz	KT	
12	Żywica	EP 6	112cP
	Rozpuszczalnik	toluen	
	Olej	Hydrol 40	
	Utwardzacz	KT	
13	Żywica	EP 6	237cP
	Rozpuszczalnik	toluen	
	Olej	Hydrol 40	
	Utwardzacz	KT	

Tablica 5. Skład betonu
Table 5. Concrete composition

Nazwa składnika	Ilość suchych składników na m ³ [kg]			
	C(0,65)	C(0,55)	C(0,45)	C(0,4)
Cement II/B-V 32,5 R	240	288	360	425
Piasek 0/2	712	699	687	675
Żwir 2/8	1224	1369	1432	1550
Woda	155	160	165	170
Wskaźnik w/c	0,65	0,55	0,45	0,40



Rys. 3. Sposób badania wnikania wody
w próbki betonu
Fig. 3. Set up for testing of water penetration
into concrete specimens



W analogiczny sposób jak badanie wnikania wody, przeprowadzono badanie wnikania oleju mineralnego z tym, że rurki szklane zamiast wodą wypełniono olejem mineralnym. Badanie wnikania oleju mineralnego miało na celu określenie stopnia zabezpieczenia powierzchni betonu przed wnikaniem tej cieczy. Badania wcześniejsze, przeprowadzone przez autorkę, wykazały, że nie wszystkie kompozycje impregnacyjne, które chronią beton przed wnikaniem wody, chronią także beton przed wnikaniem oleju. Dlatego zastosowano jako główny składnik impregnatu żywicę epoksydową.

Badanie mrozoodporności przeprowadzono metodą bezpośrednią w wodzie zgodnie z normą PN-88/B-06250. Próbkę o wymiarach $10 \times 10 \times 10$ cm, zaimpregnowane dwukrotnie za pomocą pędzla ze wszystkich stron, poddano 150 cyklom zamrażania – rozmrażania. Cyklicznemu zamrażaniu i rozmrażaniu poddano także próbki nieimpregnowane, które oznaczono „0”. Metoda bezpośrednia uwzględnia w ocenie mrozoodporności betonu zarówno stopień wewnętrznego zniszczenia, charakteryzowany przez zmianę wytrzymałości na ściskanie, jak również destrukcje zewnętrzne, określone wizualnie i ubytkiem masy. Spadek wytrzymałości na ściskanie obliczono według wzoru:

$$\Delta R = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \cdot 100 \quad [\%], \quad (1)$$

gdzie:

ΔR – średni spadek wytrzymałości,

R_1 – wytrzymałość na ściskanie próbek porównawczych,

R_2 – wytrzymałość na ściskanie próbek po 150 cyklach badania.

Badania ścieralności przeprowadzono na kostkach betonowych $7,1 \times 7,1 \times 7,1$ cm, przygotowując do badania po 3 kostki dwukrotnie zaimpregnowane z każdej strony za pomocą pędzla.

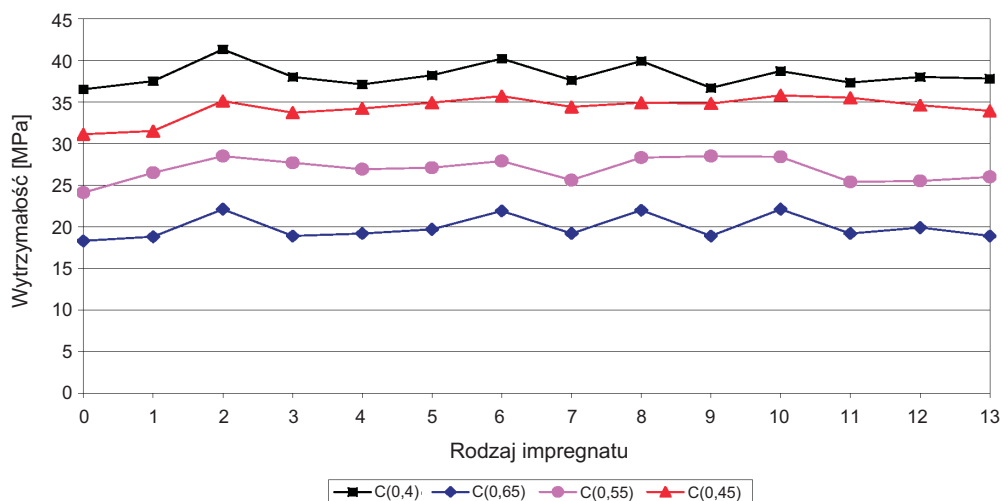
4.5. WYNIKI BADAŃ BETONU

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonu o różnych wskaźnikach $w/c = 0,4 - 0,65$, impregnowanych kompozycjami zestawionymi w tabelicy 4. Kompozycja oznaczona „0” odpowiada próbkom porównawczym, nieimpregnowanym.

Porównując wyniki badań betonu impregnowanego oznaczonego od „1” do „13” i nieimpregnowanego oznaczonego „0” stwierdzono, że po zabiegu impregnacji wytrzymałość na ściskanie betonu o wysokim wskaźniku wodno-cementowym $w/c=0,65$ wzrosła z 18 MPa do 24 MPa po zastosowaniu impregnatów oznaczonych numerami 2, 6, 8 i 10. Impregnacja betonu o $w/c=0,55$ spowodowała wzrost wytrzymałości z 24 MPa do 28 MPa po zastosowaniu impregnatów oznaczonych 2, 8, 9, 10, a w przypadku betonu o $w/c=0,45$ wzrost wytrzymałości z 32 MPa do 35 MPa ÷ 36 MPa po impregnacji



kompozycjami 2, 6, 10, 11. Dla najniższego $w/c=0,4$ wzrost wytrzymałości z 37 MPa do 40 MPa ÷ 41 MPa zaobserwowano w przypadku zastosowania impregnatu numer 2, 6, 8. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że impregnacja dała pozytywne wyniki po zastosowaniu wszystkich 13 kompozycji. Najwyższy wzrost wytrzymałości uzyskano po zastosowaniu impregnatów oznaczonych 2, 6, 8 i 10. Są to kompozycje impregnacyjne z żywicy epoksydowych: EP 6, EP 607, EP 506, utwardzacz: KT, Akfanil 50, ET z zawartością rozcieńczalnika (toluen) oraz plastyfikatora (olej mineralny). Lepkość kompozycji w temperaturze $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ wynosiła od 160 mPa·s do 315 mPa·s, głębokość wnikania impregnatu wynosiła od 1 mm do 3 mm.

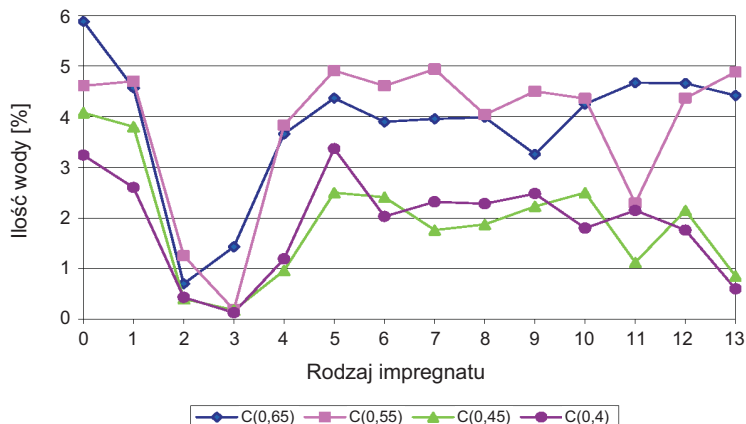


Rys. 4. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie betonu
Fig. 4. Compressive strength of concrete

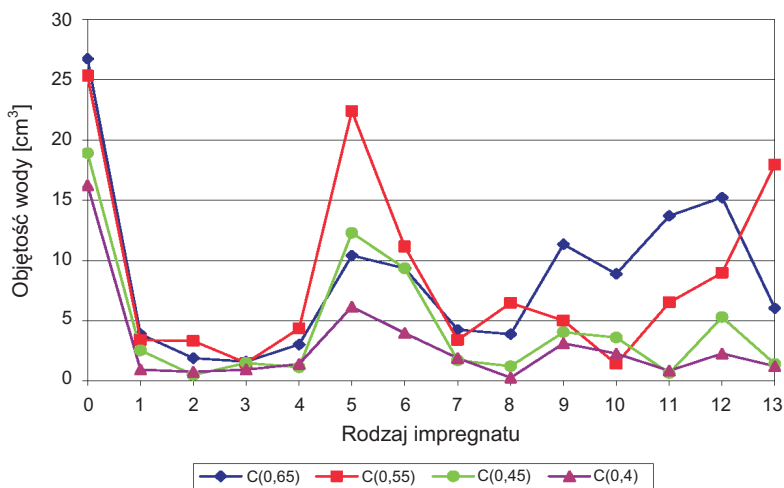
Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badania podciągania kapilarnego wody. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że nie wszystkie impregnaty w dostateczny sposób zabezpieczają przed wnikaniem wody. W najwyższym stopniu zabezpieczyły beton kompozycje oznaczone numerami 2 i 3. Były to kompozycje impregnacyjne sporządzone z żywicy epoksydowej EP 6, utwardzacz KT, rozcieńczalnika (toluen o lepkości od 160 mPa·s do 205 mPa·s). Głębokość wnikania impregnatu wynosiła 1 mm ÷ 2 mm.

Wyniki badania głębokości wnikania wody w próbki betonowe przedstawiono na rysunku 6. Stosując impregnację można obniżyć ilość wchłanianej wody, o czym świadczą otrzymywane wyniki badań. Najlepsze zabezpieczenie przed wnikaniem wody uzyskano po zastosowaniu impregnatów oznaczonych numerami 1, 2, 3, 4, 8, 11, 13. Należy zaznaczyć, że badanie nie było łatwe do przeprowadzenia ze względu na trudności uzyskania szczelności między rurką szklaną a powierzchnią zaimpregnowanego betonu.





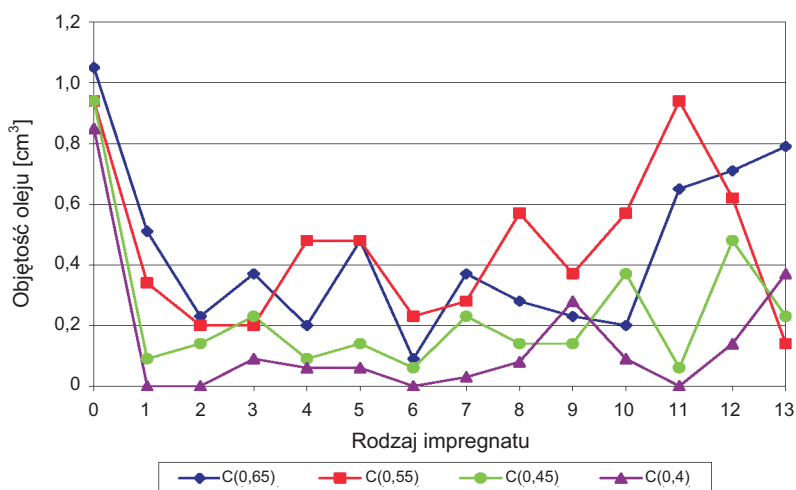
Rys. 5. Wyniki badania podciągania kapilarnego
Fig. 5. Capillary suction results



Rys. 6. Wyniki badania wnikania wody
Fig. 6. Results of water penetration

Wyniki badania głębokości wnikania oleju w próbki betonowe przedstawiono na rysunku 7. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że olej w najmniejszym stopniu wnikał w strukturę betonu oznaczonego C(0,4). Struktura betonu tej klasy jest bardziej szczelna od struktury betonu oznaczonego C(0,55), a zabieg impregnacji dodatkowo uszczelniał powierzchnię betonu i w przypadku zastosowania impregnatów oznaczonych 1, 2, 6, i 11 olej nie wnikał w powierzchnię betonu. Porównując wyniki badań próbek impregnowanych z wynikami badań dla próbek porównawczych, gdzie wnikanie oleju było duże, stwierdzono, że impregnacja dała pozytywne rezultaty.





Rys. 7. Wyniki badania wnikania oleju w próbki
Fig. 7. Results of oil penetration

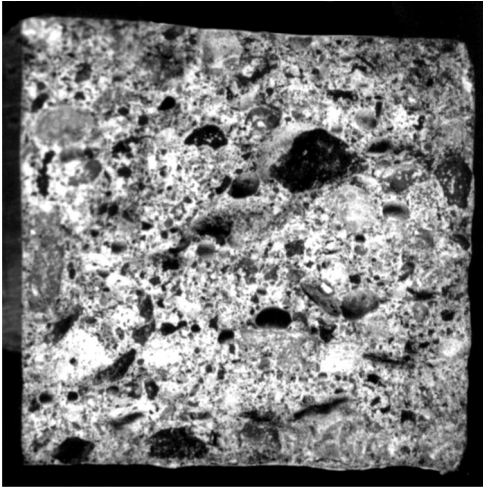
Porównując dwie metody zabezpieczenia betonu: przez impregnację powierzchni i uszczelnienie struktury wewnętrznej, nie zauważono istotnych różnic podczas analizy wyników wnikania wody i oleju, jednak na przelomach próbek o wymiarach $4 \times 4 \times 16$ cm widoczne są różnice stopnia penetracji oleju w strukturę betonu impregnowanego oraz powierzchniowo zabezpieczonego przez impregnację (impregnat oznaczony nr 2) – rysunek 8.

Wyniki badania mrozoodporności betonu podano na rysunku 9. Wśród badanych próbek zaobserwowano ubytki jedynie w kostkach porównawczych i w jednej z kostek zaimpregnowanych kompozycją nr 5. Z przedstawionych na rysunku 9 wyników badań wynika, że znaczne podwyższenie mrozoodporności nastąpiło po zastosowaniu impregnatów oznaczonych 2, 6, 8, 10 i 12.

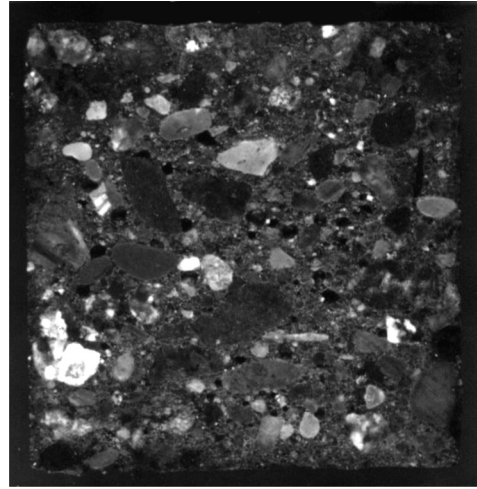
Na podstawie uzyskanych wyników badań i ich analizy, do dalszych badań wytypowano cztery impregnaty, oznaczone jako 2, 6, 8 i 10, ponieważ ich zastosowanie poprawiło właściwości betonu i chroniło w najwyższym stopniu przed działaniem wody i oleju oraz podwyższało trwałość mrozową. W tym etapie badań przeprowadzono badanie wodoszczelności oraz badanie ścieralności. Badania te przeprowadzono dla betonu C(0,55) oraz betonu C(0,55*) z dodatkiem 7% masy cementu mikrokrzemionki w celu uszczelnienia wewnętrznej struktury betonu.

Wyniki badania wodoszczelności betonu przedstawiono na rysunku 10. Zarówno impregnacja jak i uszczelnienie struktury, to zabiegi ograniczające wnikanie wody pod ciśnieniem w beton. Stosując odpowiedni skład kompozycji impregnacyjnej ograniczono głębokość wnikania wody o 50%.

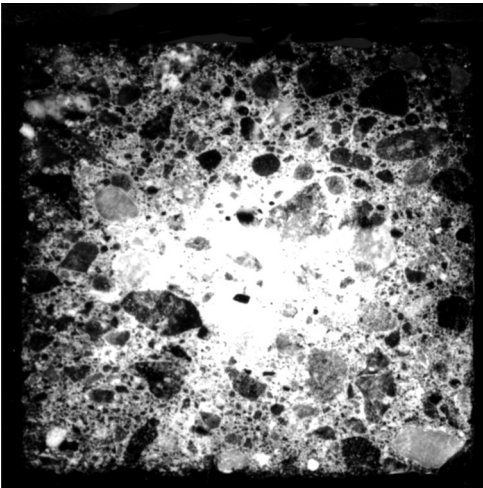




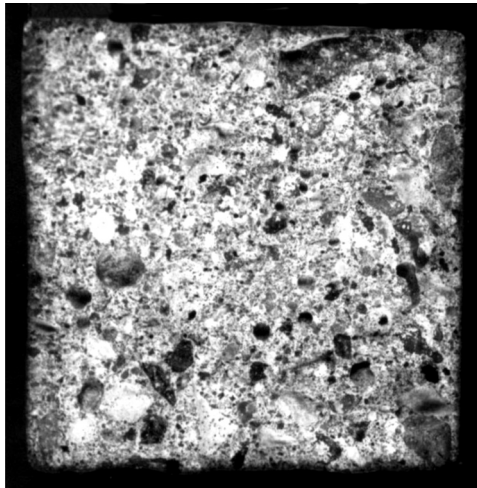
a) beton o składzie C(0,55) tabl. 5



b) beton o składzie C(0,55) tabl. 5
bez mikrokrzemionki po 12 miesiącach
przechowywania w oleju

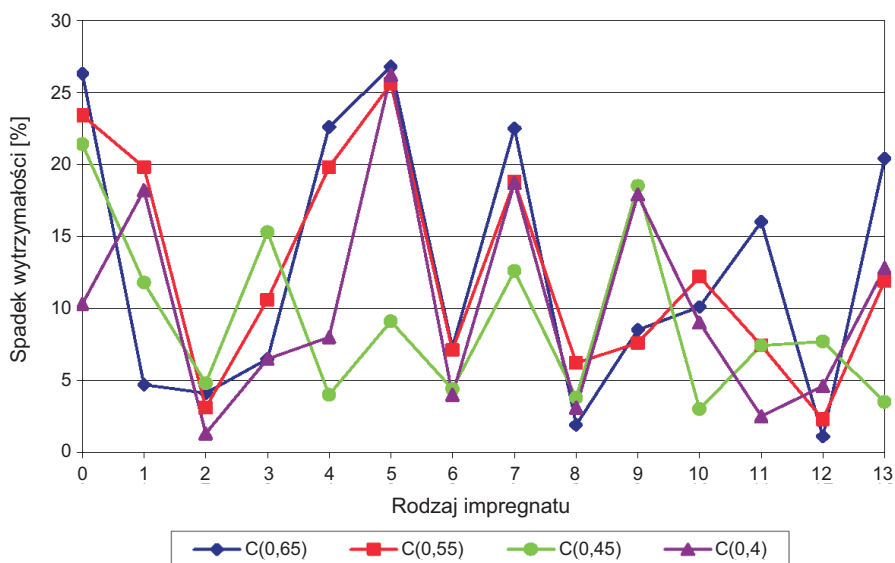


c) beton o składzie C(0,55) tabl. 5
z mikrokrzemionką po 12 miesiącach
przechowywania w oleju

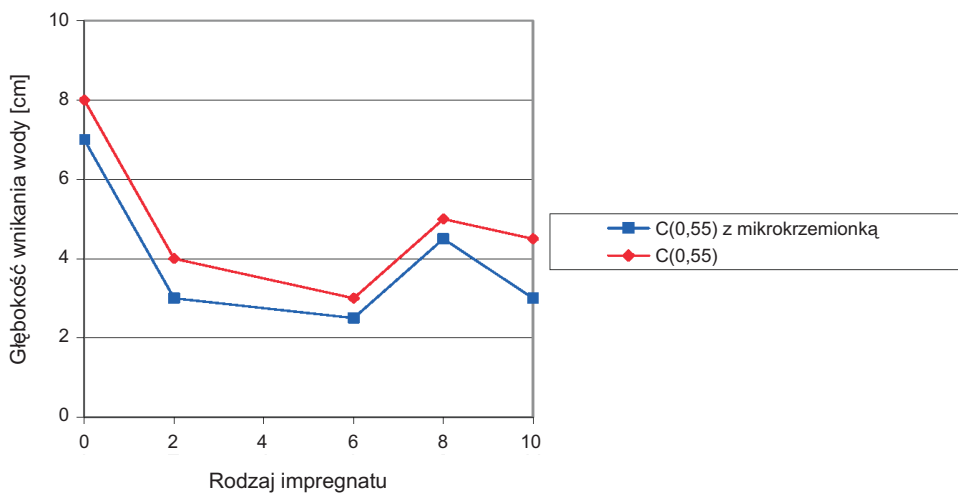


d) beton o składzie C(0,55) tabl. 5
impregnowany EP 607 po 12 miesiącach
przechowywania w oleju

Rys. 8. Różnice stopnia penetracji oleju w próbki betonu impregnowanego
Fig. 8. Differences in oil penetration into impregnated concrete specimens



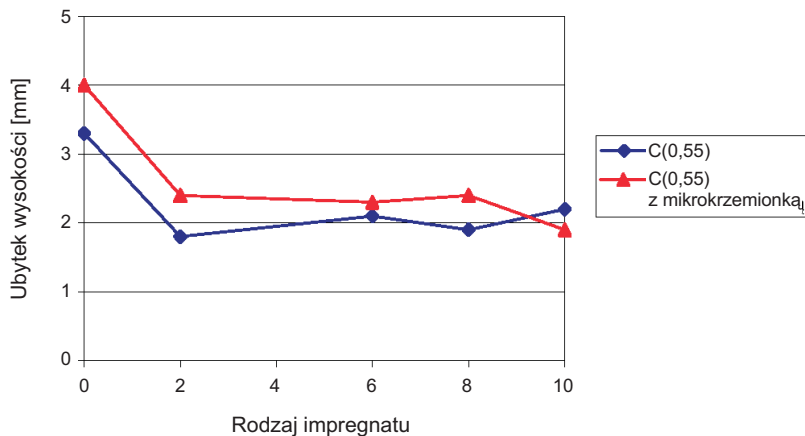
Rys. 9. Spadek wytrzymałości betonu na ściskanie po 150 cyklach badania mrozoodporności
 Fig. 9. Decrease of concrete compressive strength after 150 cycles of freezing and thawing



Rys. 10. Wyniki badania wodoszczelności betonu
 Fig. 10. Results of water resistance tests

Badanie ścieralności przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-84/B-04111 Oznaczenie wykonano na tarczy Boehmego na trzech próbkach dla każdego impregnatu oraz na próbkach wzorcowych oznaczonych „0”. Wyniki badania ścieralności betonu podano na rysunku 11. Uzyskane wyniki świadczą o poprawie odporności na ścieranie na skutek powierzchniowej impregnacji próbek.





Rys. 11. Wyniki badania ścieralności betonu

Fig. 11. Abrasion test results

5. WNIOSKI

Uzyskane wyniki świadczą o tym, że tylko częściowo można zabezpieczyć beton przed wnikaniem cieczy (woda, oleje) przez uszczelnienie struktury. W około 40% powierzchnia próbki z betonu o składzie C(0,55) (tabl. 3) z mikrokrzemionką została zaolejona. O ile przed wnikaniem cieczy takich jak woda czy roztwory soli można stosować impregnaty na bazie żywic poliestrowych, silikonowych, to zabezpieczenie powierzchni betonu przed wnikaniem oleju, a szczególnie oleju mineralnego, jest zadaniem trudnym. Dlatego przed przystąpieniem do róbek wykonawczych należy postępować zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 1504-9 i PN-EN 1504-10. Przy doborze środka impregnującego należy wziąć pod uwagę przede wszystkim rodzaj podłoża i jego stan, wilgotność oraz wszystkie czynniki zewnętrzne, które będą łącznie oddziaływały.

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące spostrzeżenia i wnioski:

- Stwierdzono wpływ impregnatów na podwyższenie wytrzymałości betonu na ściskanie.
- Wszystkie impregnaty wpłynęły na podwyższenie mrozoodporności betonu impregnowanego, ubytki stwierdzono jedynie w próbkach porównawczych. Najbardziej odporne na działanie niskich temperatur okazały się próbki zaimpregnowane preparatami z żywicy epoksydowej EP 607 z utwardzaczem Akfanil 50 i EP 6 utwardzanej KT.
- Na działanie oleju najmniej podatne okazały się próbki zaimpregnowane kompozycjami sporządzonymi na bazie żywicy EP 5 utwardzonej Z-1.
- Przed wnikaniem wody najlepiej zabezpieczały impregnaty na bazie żywicy EP 6 z utwardzaczem KT.

- Kompozycje na bazie żywicy EP 6 zabezpieczają beton zarówno przed działaniem wody jak i oleju.
- Wszystkie impregnaty spowodowały zmianę barwy betonu na ciemniejszą. Pod względem estetycznym wszystkie impregnaty nadają się do użytku.
- Zastosowanie badanych impregnatów wpłynęło na zmniejszenie ścieralności betonu.
- Zmniejszenie nasiąkliwości wodą zaobserwowano w przypadku zastosowania kompozycji impregnacyjnej z EP 607, najmniejsze dla kompozycji impregnacyjnych sporządzonych z EP 6 i EP 560.
- W wyniku impregnacji powierzchniowej próbek betonowych została ograniczona o około 50% głębokość wnikania wody pod ciśnieniem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Czarnecki L., Emmons P. H.*: Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Kraków 2003
- [2] *Fiertak M., Bodnar M.*: Ogólna charakterystyka farb, lakierów i impregnatów. Materiały Budowlane, 7, 1999, 2 - 7
- [3] *Fiertak M., Broniewski T.*: Application of dewaterers and sorbents in impregnation of building materials. Archiwum Inżynierii Lądowej, XLI, 3, 1995, 461 - 476
- [4] *Gruener M.*: Korozja i ochrona betonu. Arkady, Warszawa 1983, 188 - 190
- [5] *Broniewski T., Śliwiński J.*: Technologia, właściwości i zastosowanie betonów impregnowanych polimerami. Konferencja SITPMB, Warszawa 1980
- [6] *Śliwiński J.*: Betony impregnowane polimerami. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej 1983,
- [7] *Czarnecki L., Łukowski P.*: Naprawa i ochrona betonu zgodnie z PN-EN 1504. Materiały Budowlane, 2, 2009, 2 - 4
- [8] *Czarnecki L., Łukowski P.*: Wdrażanie normy PN-EN 1504 do stosowania w Polsce. Materiały Budowlane 2, 2010, 2 - 21
- [9] *Czarnecki L., Łukowski P.*: Ochrona i naprawa jako element strategii zarządzania konstrukcją – Normy Europejskie z serii PN-EN 1504. VI Konferencja „Dni Betonu”, Wisła, 2010
- [10] PN-EN 1504-9 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 9: Podstawowe zasady dotyczące stosowania wyrobów i systemów.
- [11] *Broniewski T., Śliwiński J.*: Study of the significance of the polymer phase in the impregnated concrete. 4th Int. Congress on Polymers in Concrete, Darmstadt, 1984
- [12] *Aquiar J., Moreira P., Łukowski P., Czarnecki L., Camoes A., Van Gemert D.*: Ranking procedure for polymeric coatings and hydrophobic agents for concrete protection. Restoration of Buildings and Monuments, 4, 2007, 251 - 264



- [13] PN-EN 1504-10 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje. Wymagania. Sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 10: Stosowanie wyrobów i systemów na placu budowy oraz sterowanie jakością prac
- [14] *Brojer Z., Hertz Z., Penczek P.*: Żywice epoksydowe. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982
- [15] *Paquin A.M.*: Epoxydverbindungen und Epoxydharze. Berlin – Gröttingen – Heidelberg. Springer-Verlag, 1958
- [16] *Brojer Z., Penczek P.*: Utwardzanie żywic epoksydowych w temperaturach niższych od pokojowej. Polimery – Tworzywa Wielkocząsteczkowe, 10, 1965
- [17] *Błaszczński T.*: Durability of cement based composite systems influenced by physico-chemical agents, in A.H. Cardon & G. Verchery (eds): Durability of polymer based composite systems for structural application. Elsevier Science Publisher, London 1991, 504 - 513
- [18] *Kurpińska M.*: Impregnacja betonu. Praca doktorska. Politechnika Gdańska, 2005
- [19] *Hertz J., Krogh A., Palmer R.*: Wstęp do teorii obliczeń neuronowych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996
- [20] *Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D.*: Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy i zastosowanie. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1994
- [21] *Osowski S.*: Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996

INFORMACJE DODATKOWE

Artykuł powstał na podstawie badań finansowanych przez Komitet Badań Naukowych w ramach grantu nr 0894/T07/2003/25.

PROPERTIES OF CONCRETE IMPREGNATED USING EPOXY COMPOSITION

Abstract

Surface waterproofing of concrete elements of roads and bridges allows a reduction of penetration of gasses and liquids and hence prevention of concrete deterioration. The main subject of this study is the influence of properties of waterproofing materials on strength and durability of concrete. To design waterproofing materials four different epoxy resins were used. Selection of waterproofing materials out of 160 different compositions was based on the following criteria: viscosity, density, depth of penetration and time of gelation. Experimental tests on concrete specimens were performed to evaluate the effectiveness of designed waterproofing materials for strength and durability improvement.