

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej

**Wpływ dodatku wybranych nanocząstek
na podstawowe właściwości cementowej
warstwy wierzchniej wysokiej
wytrzymałości w podłogach**

Raport serii PRE nr 3/2021

Praca doktorska

Jacek Szymanowski

Słowa kluczowe:
warstwa wierzchnia
podłogi
nanocząstki
podkład
zespolenie

Promotor: dr hab. inż. Łukasz Sadowski, prof. uczelni

Wrocław, wrzesień 2021

Autor:

mgr inż. Jacek Szymanowski

.....

Politechnika Wroclawska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
tel. 71 320 39 28
e-mail: jacek.szymanowski@pwr.edu.pl

Raport został złożony w Redakcji Wydawnictw Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej we wrześniu 2021 r.

Lista odbiorców:

Recenzenci	2 egz.
Promotor	1 egz.
Autor	2 egz.
CWiINT PWr	1 egz.
Archiwum W-2	2 egz.

Z uwagi na nieocenioną pomoc, cenne wskazówki oraz merytoryczne wsparcie chciałbym serdecznie podziękować promotorowi dr hab. inż. Łukaszowi Sadowskiemu, prof. uczelni.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w rozprawie	7
Wykaz ważniejszych skrótów i definicji stosowanych w rozprawie.....	8
1. WPROWADZENIE W PROBLEMATYKĘ ROZPRAWY	9
2. CELE I ZAKRES ROZPRAWY	13
2.1. Cele rozprawy	13
2.2. Zakres rozprawy	13
3. ROZPOZNANIE LITERATUROWE	15
3.1. Podstawowe informacje o warstwach wierzchnich w podłogach	15
3.2. Metody badania właściwości adhezyjnych cementowej warstwy wierzchniej	21
3.2.1. Badanie przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu metodą odrywania	22
3.3. Metody badania właściwości funkcjonalnych cementowych warstw wierzchnich.....	23
3.3.1. Badanie ścieralności	23
3.3.2. Badanie przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie warstwy wierzchniej.....	25
3.4. Ocena struktury zapraw cementowych metodą skaningowej mikroskopii elektronowej.....	26
3.5. Przegląd dotychczasowych działań mających na celu poprawę właściwości adhezyjnych cementowej warstwy wierzchniej w podłogach	28
3.5.1. Teksturowanie powierzchni podkładu betonowego.....	28
3.5.2. Przygotowanie mechaniczne powierzchni podkładu betonowego.....	30
3.5.3. Wzmacnianie powierzchniowe podkładu betonowego środkami szepnymi.....	37
3.5.4. Stosowanie dodatków do zaprawy cementowej stanowiącej warstwę wierzchnią.....	38
3.6. Przegląd stosowanych sposobów poprawy właściwości wytrzymałościowych i funkcjonalnych cementowej warstwy wierzchniej	41
3.7. Wnioski z przeglądu literaturowego	46

4. OPIS BADANEGO MATERIAŁU, ZAKRES I METODYKA BADAŃ WŁASNYCH	49
4.1. Opis badanego materiału	49
4.2. Zakres badań własnych	54
4.3. Metodyka badań właściwości świeżej zaprawy	55
4.3.1. Konsystencja	55
4.3.2. Gęstość objętościowa	56
4.3.3. Czasy wiązania	57
4.4. Metodyka badań właściwości fizycznych	58
4.4.1. Gęstość objętościowa	58
4.4.2. Porowatość	58
4.5. Metodyka badań właściwości wytrzymałościowych	59
4.5.1. Wytrzymałość na ściskanie	59
4.5.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	59
4.6. Metodyka badań właściwości adhezyjnych	60
4.6.1. Przyczepność przy odrywaniu warstwy cementowej wierzchniej wysokiej wytrzymałości od podkładu	60
4.6.2. Badania uzupełniające przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej w funkcji grubości warstwy wierzchniej	64
4.6.3. Badania uzupełniające struktury zaprawy w strefie zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego	64
4.7. Metodyka badań właściwości funkcjonalnych	67
4.7.1. Ścieralność	67
4.7.2. Przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie zaprawy warstwy wierzchniej	68
4.7.3. Badania uzupełniające struktury zaprawy w strefie przypowierzchniowej warstwy wierzchniej z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego	71
4.8. Statystyczna analiza wyników badań	71
5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA	72
5.1. Właściwości świeżej zaprawy	72

5.2. Właściwości fizyczne	74
5.3. Właściwości wytrzymałościowe	75
5.4. Właściwości adhezyjne	76
5.4.1. Przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu	76
5.4.2. Badania uzupełniające przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej w funkcji grubości warstwy wierzchniej	77
5.4.3. Badania uzupełniające struktury zaprawy w strefie zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego	78
5.4.4. Wpływ średniej wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej na jej przyczepność przy odrywaniu od podkładu.....	79
5.4.5. Wpływ wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zaprawy cementowej na jej przyczepność przy odrywaniu od podkładu.....	81
5.5. Właściwości funkcjonalne warstwy wierzchniej	82
5.5.1. Ścieralność.....	82
5.5.2. Przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie zaprawy warstwy wierzchniej.....	82
5.5.3. Badania uzupełniające struktury zaprawy w strefie przypowierzchniowej warstwy wierzchniej z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego	83
5.6. Wyniki statystycznej analizy wyników badań	92
6. ANALIZA WYDAJNOŚCI MECHANICZNEJ WARSTW WIERZCHNICH MODYFIKOWANYCH WYBRANYMI NANOCZĄSTKAMI	95
7. PODSUMOWANIE, WNIOSKI, UWAGI KOŃCOWE I PROPONOWANE KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ	102
7.1. Podsumowanie	102
7.2. Wnioski	104
7.3. Uwagi końcowe	110
7.4. Proponowane kierunki dalszych badań	112
8. LITERATURA	113
Streszczenie	128
Summary	129

Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w rozprawie

- A_A - udział odsłoniętego kruszywa,
 c_L - prędkość podłużnej fali ultradźwiękowej,
 f_b - przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu,
 f_c - wytrzymałość zaprawy cementowej na ściskanie,
 f_{cm} - wytrzymałość średnia zaprawy cementowej na ściskanie,
 f_{ct} - wytrzymałość średnia zaprawy cementowej na rozciąganie przy zginaniu,
 f_h - przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie warstwy wierzchniej,
 H - grubość warstwy wierzchniej,
 l_N - zagłębienie stożka Novikowa,
 L - liczba odbicia,
 n_w - nasiąkliwość wagowa,
 Δm - ścieralność (jako ubytek masy),
MPR - współczynnik wydajności mechanicznej,
 p - porowatość całkowita,
 R_a - średnia arytmetyczna wysokość powierzchni betonu,
 R_q - odchylenie wartości średniokwadratowej powierzchni betonu,
 s - szczelność,
 S_{dr} - rozwinięty stosunkiem pola międzyfazowego powierzchni,
 w_m - wilgotność masowa,
 ΔV - ścieralność (jako ubytek objętości),
 ρ_0 - gęstość objętościowa,
 ρ_w - gęstość właściwa,
 ϕ - udział frakcyjny porów.

Wykaz ważniejszych skrótów i definicji stosowanych w rozprawie

Dodatek	- Droбноziarnisty nieorganiczny składnik stosowany do betonu w celu poprawy wybranych właściwości lub uzyskania specjalnych właściwości,
Nanocząstka	- Fragment materii o wymiarze nie przekraczającym 100 nanometrów,
Podłoga	- Poziomy element wykończenia pomieszczeń w budynku, który zasadniczo składa się z warstwy wierzchniej (zwanej także posadzką, jastychem lub podkładem podłogowym) ułożonej na podkładzie,
Zespolenie	- Wartość przyczepności przy odrywaniu f_b warstwy wierzchniej od podkładu (w MPa),
SEM	- Skaningowa mikroskopia elektronowa (ang. <i>scanning electron microscopy</i>), metoda obrazowania struktury materiału przy wykorzystaniu wiązki elektronów,
BSE	- Elektrony wstecznie rozproszone (ang. <i>backscattered electrons</i>) to elektrony ulegające odbiciu sprężystemu od jąder atomowych próbki w badaniach metodą skaningowej mikroskopii elektronowej,
SE	- Elektrony wtórne (ang. <i>secondary electrons</i>) są to w dużym stopniu elektrony wyemitowane z atomów blisko powierzchni próbki poprzez zderzenie z elektronami emitowanymi przez działło elektronowe w badaniach metodą skaningowej mikroskopii elektronowej.

1. WPROWADZENIE W PROBLEMATYKĘ ROZPRAWY

Posadzki stanowią warstwę wierzchnią podłóg w budynkach mieszkalnych i użyteczności publicznej oraz budynkach przemysłowych. Są one zazwyczaj wykonywane z zaprawy cementowej. Jest oczywiste, że w zależności od wymogów użytkowych obiektu, ale również ze względu na trwałość, warstwy wierzchnie powinny posiadać odpowiednie parametry wytrzymałościowe i funkcjonalne takie jak wytrzymałość na ściskanie i na zginanie, przypowierzchniową wytrzymałość na rozciąganie, ścieralność ([26], [108]). W celu uzyskania tych parametrów na żądanym poziomie stosuje się zabiegi dodatkowe w postaci wzmocnienia zbrojeniem rozproszonym (włókna), utwardzania powierzchniowego (np. utwardzacz mineralne, metaliczne) oraz impregnowania. Ponadto, z uwagi na trwałość, od cementowej warstwy wierzchniej wymagane jest posiadanie odpowiednich właściwości adhezyjnych. W podłogach szczególnie wymagana jest odpowiednia przyczepność przy odrywaniu f_b cementowej warstwy wierzchniej od podkładu betonowego. W celu poprawy tej przyczepności stosuje się między innymi przygotowanie mechaniczne powierzchni podkładu betonowego, zwiększenie efektywnej powierzchni rozwinięcia, usunięcie mleczka cementowego z powierzchni podkładu, powierzchniowym odkryciu kruszywa podkładu, wzmocnieniu powierzchni podkładu betonowego za pomocą środków szepnych. Stosuje się także w tym celu różne dodatki do zaprawy stanowiącej warstwę wierzchnią. O wydajności mechanicznej warstw wierzchnich decydują właściwości wytrzymałościowe, adhezyjne i funkcjonalne.

Dotychczas w literaturze wykazano, na podstawie badań, że mechaniczne przygotowanie powierzchni podkładu betonowego poprzez śrutowanie wpływa korzystnie na właściwości adhezyjne cementowej warstwy wierzchniej ([13], [24], [46], [121], [123]). W literaturze wykazano również, że rośnie poziom przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie podkładu betonowego wraz ze wzrostem jego wytrzymałości na ściskanie [129], [130]. Dostrzegany jest w literaturze także problem niższej przypowierzchniowej wytrzymałości na ściskanie cementowych warstw wierzchnich mający związek z kierunkiem ich betonowania w poziomie [18]. Z prac Stawiskiego i innych ([140], [141], [142]) wynika, że wartość wytrzymałości w górnej strefie posadzki może czasami znacznie odbiegać od wartości wytrzymałości w strefach środkowej i dolnej. Znaczenie ma również sposób układania mieszanki [32]. Ponieważ górna strefa warstwy wierzchniej podlega bezpośrednim oddziaływaniom eksploatacyjnym wiedza na temat wytrzymałości na ściskanie i na

przypowierzchniowe rozciąganie w tej strefie jest bardzo ważna z uwagi na trwałość i na bezpieczeństwo użytkowania i to szczególnie wtedy, gdy warstwa wierzchnia jest ostateczną warstwą wykończeniową podłogi.

W ostatnich latach wykazano, że zastosowanie dodatków w postaci metakaolinu, fosforanu magnezu, popiołu lotnego do zaprawy cementowej warstwy wierzchniej wpływa korzystnie na jej właściwości adhezyjne ([52], [85], [87], [106]) oraz, że zastosowanie mączki kwarcowej jako dodatku do zaprawy cementowej warstwy wierzchniej nie wpływa korzystnie na jej właściwości adhezyjne [115]. W literaturze przedstawiono również zastosowanie m.in. mączek mineralnych, włókien polipropylenowych, odpadowych dodatków ceramicznych, pumeksu bazaltowego, włókien stalowych i miedzianych ([15], [39], [97], [105]) jako dodatku do zapraw i betonów mających na celu poprawę właściwości funkcjonalnych cementowych warstw wierzchnich, głównie ścieralności.

W literaturze sygnalizuje się, że modyfikacja składu zaprawy cementowej warstwy wierzchniej dodatkiem nanocząstek tlenku krzemu (SiO_2) może poprawić jej właściwości adhezyjne i funkcjonalne ([53], [57], [135]), ale brak jest w tej kwestii szerszych badań. Ciągłe prowadzone są jednak prace mające na celu udoskonalanie właściwości cementowych warstw wierzchnich. Związane jest to z coraz częstszym stosowaniem w podłogach cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości, tj. o wytrzymałości na ściskanie powyżej 60 MPa i wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu powyżej 7 MPa. Szczególnie przydatne do tego celu może być stosowanie dodatków o coraz drobniejszych ziarnach, na przykład nanocząstek. Do wykonywania warstw wierzchnich nowobudowanych najczęściej wykorzystywane są zaprawy cementowe zwykłej wytrzymałości [111]. Z kolei w przypadku warstw wierzchnich naprawczych stosowane są coraz częściej zaprawy wysokiej wytrzymałości [27].

Nanocząstki to fragmenty materii o jednym z wymiarów mniejszym niż 100 nm [138]. Zastosowanie nanocząstek w budownictwie pozwala na polepszenie niektórych właściwości materiałów budowlanych (np. mrozoodporności, energooszczędności czy odporności chemicznej), oraz na tworzenie materiałów bądź kompozytów o nowych właściwościach takich jak np. samooczyszczenie, samonaprawa czy właściwości antybakteryjne ([54], [66], [131], [158]). Zdaniem autora, to właśnie cementowymi warstwami wierzchnimi wysokiej wytrzymałości należy się zająć w aspekcie ich modyfikacji nanocząstkami.

Zdaniem autora zastosowanie dodatku nanocząstek do zaprawy cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości może korzystnie wpłynąć na właściwości wytrzymałościowe, adhezyjne i funkcjonalne warstwy wierzchniej. Wskazują na to na przykład prace ([53], [57], [65], [135]), jednak wciąż brak jest szerszych badań w tej kwestii. Należy

zaznaczyć, że dotychczasowe badania wpływu modyfikacji cementowych warstw wierzchnich dodatkiem nanocząstek nie są liczne. To, że nanocząstki mogą poprawić niektóre cechy betonu wykazał na podstawie betonu samozagęszczającego się między innymi Niewiadomski [94], Niewiadomski i inni ([93], [95], [96]) oraz Stefaniuk i inni [143], według których modyfikacja betonu samozagęszczającego nanocząstkami skutkuje zmniejszeniem jego porowatości w stosunku do betonu bez dodatku. Jak wynika z badań przeprowadzonych między innymi w ([8], [40], [41]) nanocząstki w postaci metylosilikonowych polimerów nadają się do impregnacji i hydrofobizacji materiałów porowatych dzięki skutecznym wypełnianiu porów powietrznych. Z kolei w pracy [9] wykazano, że zastosowanie nanocząstek w postaci nanokryształów i nanowłókien celulozy wpływa pozytywnie na wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne betonu, np. mrozoodporność. Natomiast Szostak i Golewski w pracy [145] wykazali, że zastosowanie dodatku krzemionkowych popiołów lotnych oraz nanodomieszki CSH wpływa pozytywnie na wytrzymałość na ściskanie betonu.

Na podstawie analizy literatury przedmiotu przeprowadzonej między innymi w ([147], [109], [110]) w zastosowaniu nanocząstek jako dodatku do zaprawy wysokiej wytrzymałości stanowiącej warstwę wierzchnią można upatrywać szansy poprawy jej właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych i funkcjonalnych. Na chwilę obecną badania te są niepełne i wybiórcze. Nie dają pełnej odpowiedzi na pytanie, które nanocząstki, dlaczego i w jakiej ilości warto stosować do wykonywania cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości. W tej kwestii istnieją w literaturze luki, zwłaszcza w odniesieniu do zapraw cementowych wysokiej wytrzymałości służących do wykonywania warstw wierzchnich, dla których istnieje bardzo niewiele badań. Tą lukę w literaturze starał się wypełnić autor niniejszej rozprawy wykorzystując do tego celu nanocząstki tlenku krzemu (SiO_2), tlenku aluminium (Al_2O_3) i tlenku tytanu (TiO_2). Reasumując, brak jest rezultatów badań wpływu dodatku wybranych nanocząstek na podstawowe właściwości cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości w podłogach.

Powyższe przemyślenia skłoniły autora do sformułowania celów rozprawy, w kwestii uzyskania na drodze badawczej odpowiedzi na pytania: jaki jest wpływ dodatku wybranych nanocząstek na podstawowe właściwości cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości w podłogach, a jaki rodzaj i ilość dodatku tych nanocząstek ma, zauważalny na różnych poziomach obserwacji struktury zaprawy cementowej, pozytywny wpływ na właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej przy równoczesnym polepszeniu lub przynajmniej nie pogorszeniu właściwości wytrzymałościowych i funkcjonalnych tej warstwy.

Niniejsza rozprawa składa się z 7 rozdziałów.

W rozdziale 1 dokonano wprowadzenia w tematykę rozprawy.

W rozdziale 2 sformułowano cele rozprawy oraz określono jej zakres.

W rozdziale 3 przedstawiono przegląd literatury dotyczącej tematyki rozprawy. W sposób syntetyczny przedstawiono metody badania właściwości adhezyjnych cementowej warstwy wierzchniej w podłogach. Opisane zostały także metody badania właściwości funkcjonalnych cementowych warstw wierzchnich tj. ścieralności i przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie. Ponadto przedstawiono przegląd dotychczasowych działań mających na celu polepszenie przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu oraz przegląd metod stosowanych w celu polepszenia właściwości funkcjonalnych cementowych warstw wierzchnich, a także sformułowano wnioski z przeglądu literaturowego.

W rozdziale 4 przedstawiono zakres badań własnych cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości w podłogach oraz przedstawiono opis badanych elementów.

W rozdziale 5 przedstawiono wyniki badań własnych cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości w podłogach oraz ich analizę dla 10 serii zapraw różniących się ilością i rodzajem wybranej nanocząstki w składzie zaprawy cementowej (1 seria zaprawy referencyjnej bez dodatku nanocząstek, 3 serie zapraw z dodatkiem nanocząstek SiO₂, 3 serie zapraw z dodatkiem nanocząstek Al₂O₃ oraz 3 serie zapraw z dodatkiem nanocząstek TiO₂). Analiza obejmowała wyniki badań świeżej zaprawy cementowej (konsystencja, gęstość objętościowa, czasy wiązania), właściwości fizycznych stwardniałej zaprawy cementowej (gęstość objętościowa, porowatość), właściwości wytrzymałościowych stwardniałej zaprawy cementowej (wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu), właściwości adhezyjnych (przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu) uzupełnionych o wyniki badań przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej w funkcji grubości zaprawy warstwy wierzchniej i wyniki badań struktury próbek zaprawy wyciętych ze strefy zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem betonowym, a także właściwości funkcjonalnych warstwy wierzchniej (ścieralność, przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie) uzupełnionych o wyniki badań struktury próbek zaprawy wyciętych ze strefy przypowierzchniowej warstwy wierzchniej.

W rozdziale 6 przedstawiono analizę wydajności mechanicznej cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości modyfikowanych wybranymi nanocząstkami.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie, wnioski, uwagi końcowe i proponowane kierunki dalszych badań.

Rozprawę kończy wykaz literatury.

2. CELE I ZAKRES ROZPRAWY

2.1. Cele rozprawy

Ogólnym celem naukowym rozprawy jest ocena wpływu dodatku wybranych nanocząstek na podstawowe właściwości cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach.

W szczególności celem jest ocena wpływu dodatku nanocząstek SiO_2 , Al_2O_3 i TiO_2 na takie podstawowe właściwości cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach jak:

- właściwości świeżej zaprawy (konsystencja, gęstość objętościowa, czasy wiązania),
- właściwości fizyczne (gęstość objętościowa, porowatość),
- właściwości wytrzymałościowe (wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu),
- właściwości adhezyjne (przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu),
- właściwości funkcjonalne (ścieralność, przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie).

Celem aplikacyjnym jest wyselekcjonowanie na drodze badawczej rodzaju i ilości dodatku tych nanocząstek, dla których zauważalna będzie poprawa wydajności mechanicznej cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach z punktu widzenia jej podstawowych właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych i funkcjonalnych.

2.2. Zakres rozprawy

Zakres rozprawy odzwierciedla cele rozprawy i składają się na niego następujące punkty:

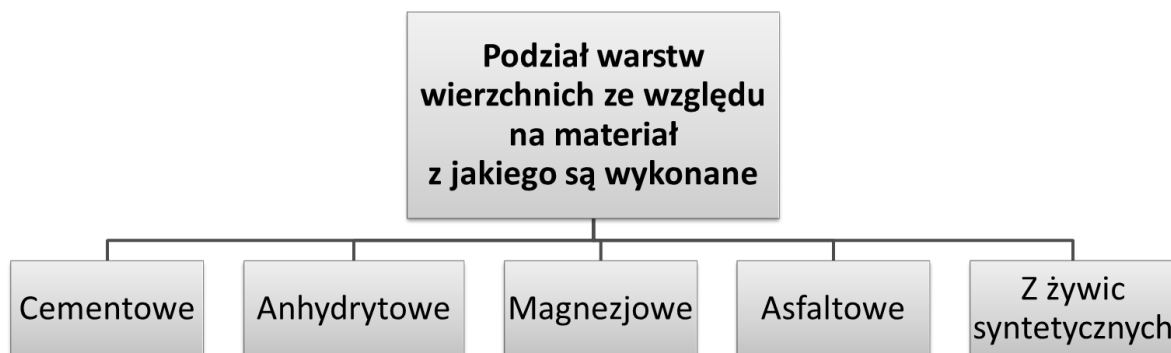
1. Dokonanie krytycznego przeglądu literaturowego dotyczącego zagadnień związanych z rozprawą.
2. Zaplanowanie zakresu badań własnych oraz wybór metod badawczych.
3. Określenie składu betonu do wykonania podkładu oraz składu zaprawy użytej do wykonania cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości.
4. Wykonanie podkładu betonowego.
5. Przygotowanie powierzchni podkładu betonowego poprzez śrutowanie.

-
6. Określenie wybranych właściwości świeżej zaprawy cementowej użytej do wykonania cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości (konsystencja, czasy wiązania, gęstość objętościowa).
 7. Zaplanowanie i wykonanie odpowiedniej liczby próbek do badań podstawowych właściwości cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości.
 8. Przeprowadzenie dla stwardniałych zapraw cementowych badań podstawowych właściwości fizycznych (gęstość objętościowa, porowatość).
 9. Przeprowadzenie dla stwardniałych zapraw cementowych badań podstawowych właściwości wytrzymałościowych (wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu).
 10. Wielowariantowe wykonanie na podkładach warstwy wierzchniej z zapraw cementowych modyfikowanych dodatkiem różnej ilości nanocząstek SiO_2 , Al_2O_3 i TiO_2 .
 11. Określenie właściwości adhezyjnych cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w rozumieniu jej przyczepności przy odrywaniu od podkładu.
 12. Wykonanie uzupełniających badań przebiegu fali ultradźwiękowej w funkcji grubości warstwy wierzchniej.
 13. Wykonanie uzupełniających badań struktury zaprawy próbek wyciętych ze strefy zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem betonowym
 14. Określenie właściwości funkcjonalnych cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości (ścieralność, przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie).
 15. Wykonanie uzupełniających badań struktury zaprawy próbek wyciętych ze strefy przypowierzchniowej warstwy wierzchniej.
 16. Dokonanie analizy uzyskanych rezultatów badań.
 17. Przeprowadzenie analizy wydajności mechanicznej warstw wierzchnich modyfikowanych wybranymi nanocząstkami.
 18. Podsumowanie, sformułowanie wniosków oraz zaproponowanie dalszych kierunków badań.

3. ROZPOZNANIE LITERATUROWE

3.1. Podstawowe informacje o warstwach wierzchnich w podłogach

Według [157] podłoga to poziomy element wykończenia pomieszczeń w budynku, który zasadniczo składa się z warstwy wierzchniej ułożonej na podkładzie ([48], [63],[109], [153]). Na Rys. 1 pokazano opracowany na podstawie [56] podział warstw wierzchnich ze względu na materiał z jakiego są wykonane. Warto w tym miejscu nadmienić, że w praktyce bardzo często warstwa wierzchnia nazywana jest także jastychem, a zgodnie z normą PN-EN 13318 podkładem podłogowym. Generalnie warstwy wierzchnie, ze względu na materiał z jakiego są wykonane, możemy podzielić na cementowe, anhydrytowe, magnezjowe, asfaltowe oraz z żywic syntetycznych.

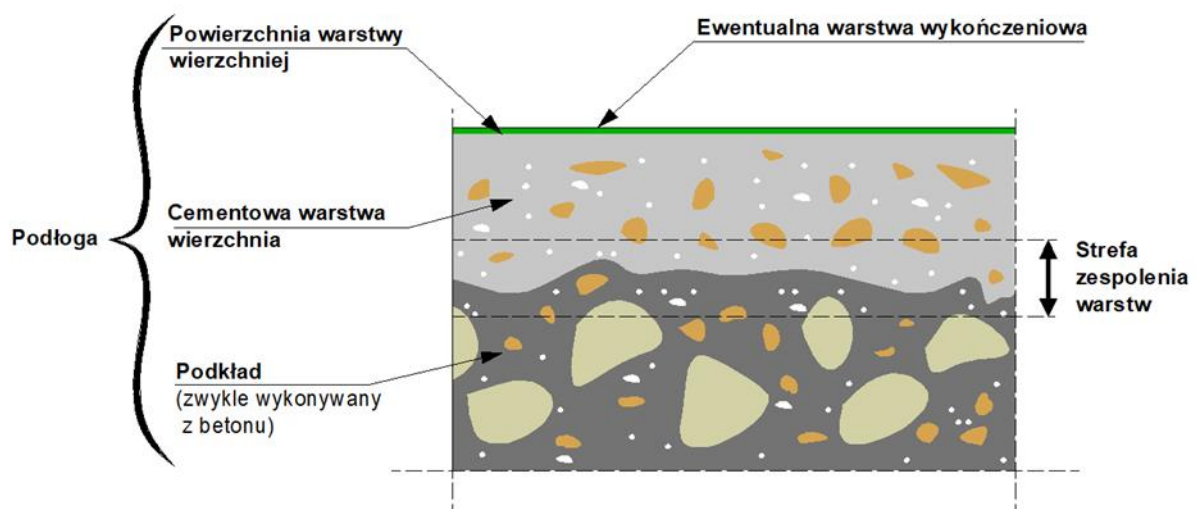


Rys. 1. Podział warstw wierzchnich ze względu na materiał z jakiego są wykonane
(opracowanie własne na podstawie [56])

I tak, cementowe warstwy wierzchnie produkowane są zazwyczaj z zapraw cementowych. Nadają się do układania na nich kolejnych warstw wykończeniowych takich jak np. panele, płytki ceramiczne lub różnego rodzaju wykładziny. Generalnie cechują się odpowiednią mrozoodpornością oraz wodoodpornością i nadają się do stosowania zarówno wewnątrz i na zewnątrz oraz w pomieszczeniach o podwyższonej wilgotności. Z kolei anhydrytowe warstwy wierzchnie wytwarza się z użyciem bezwodnego siarczanu wapnia (anhydrytu) oraz spowalniaczy wiązania. Ich zaletą jest płynna konsystencja, a wadą stosunkowo niska mrozoodporność i odporność na wilgoć oraz wyższa cena w porównaniu po warstw wierzchnich cementowych. Jeżeli chodzi o magnezjowe warstwy wierzchnie, to

produkuje się z użyciem magnezytu kaustycznego. Zazwyczaj cechują się one wyższą twardością w stosunku do cementowych warstw wierzchnich. Magnezjowe warstwy wierzchnie stosowane są zazwyczaj wewnątrz pomieszczeń. Asfaltowe warstwy wierzchnie produkuje się przy użyciu lanego asfaltu, mączki kamiennej i kruszywa drobnego. Ich zaletą w stosunku do cementowych warstw wierzchnich jest krótki czas po którym posadzka może być użytkowana (po wystygnięciu). Ostatnia z omawianych rodzajów warstw wierzchnich wykonywana jest z żywic syntetycznych i cechuje się bardzo krótkim czasem wykonania (od kilkudziesięciu minut) po którym mogą być użytkowane, a także wysoką wytrzymałością. Ich wadą jest jednak cena, gdyż są to jedne z najdroższych warstw wierzchnich. Spośród omawianych powyżej rodzajów warstw wierzchnich najczęściej w praktyce budowlanej wykonuje się cementowe warstwy wierzchnie.

Typowy układ warstw w podłodze z cementową warstwą wierzchnią ilustruje Rys. 2. Należy podkreślić, że w cementowe warstwy wierzchniej są układane na podkładzie, który jest zwykle wykonywany z betonu. Pomiędzy cementową warstwą wierzchnią a podkładem można wyróżnić strefę zespolenia warstw.

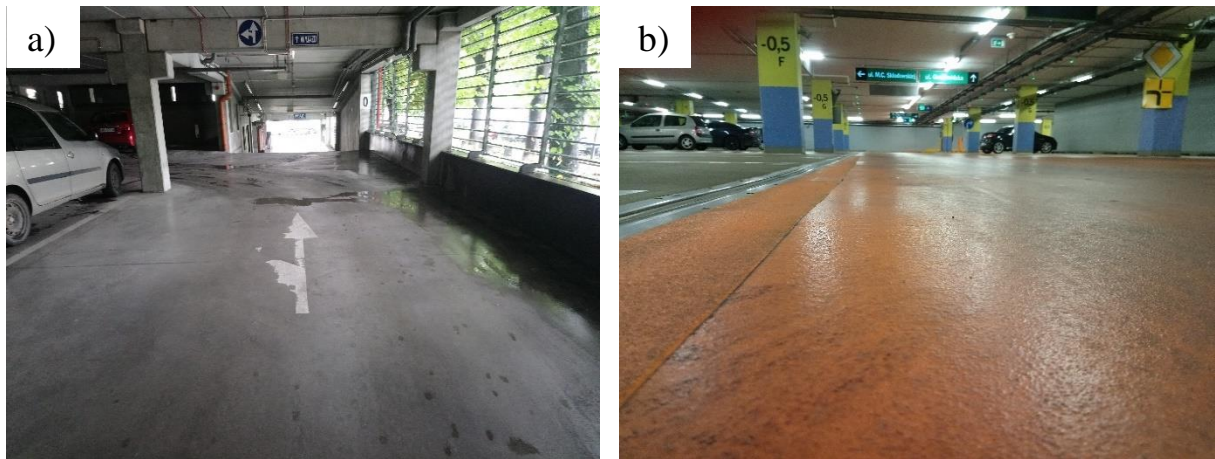


Rys. 2. Typowy układ warstw w podłodze z cementową warstwą wierzchnią (na podstawie [147])

Należy w tym miejscu podkreślić, że technologia wykonywania cementowych warstw wierzchnich nie zakłada specjalistycznego ich zagęszczania, a jedynie wyrównanie ich powierzchni, co wg. [114] powoduje problemy z zagęszczeniem zaprawy cementowej w strefie zespolenia z podkładem oraz osłabienie materiału w strefie przypowierzchniowej.

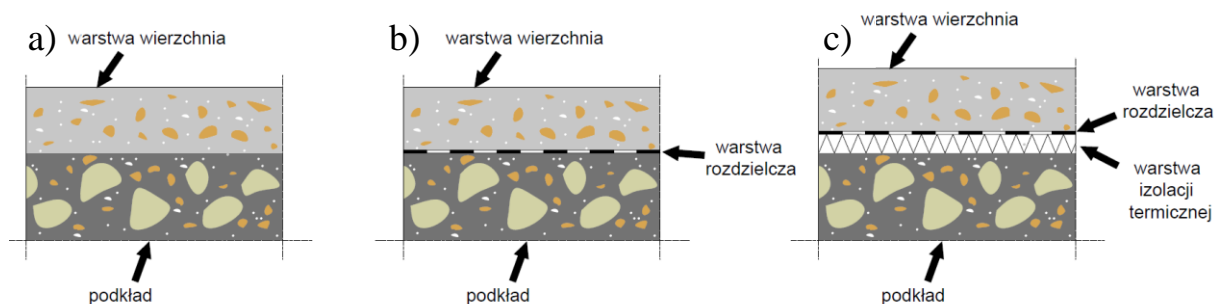
Należy zauważyć, że cementowa warstwa wierzchnia może stanowić warstwę wykończeniową podłogi, jak to ma często miejsce np. w budynkach przemysłowych, garażach

wielostanowiskowych, tak jak to przykładowo przedstawiono na Rys. 3a. Z drugiej strony warstwa ta może także stanowić podkład pod warstwę wykończeniową z takich materiałów jak tworzywo sztuczne, płytki ceramiczne, parkiet, itp. (patrz przykładowo Rys. 3).



Rys. 3. Przykładowy widok cementowej warstwy wierzchniej podłogi w garażu wielostanowiskowym w sytuacji gdy warstwa wierzchnia stanowi: a) warstwę wykończeniową, b) podkład pod warstwę wykończeniową

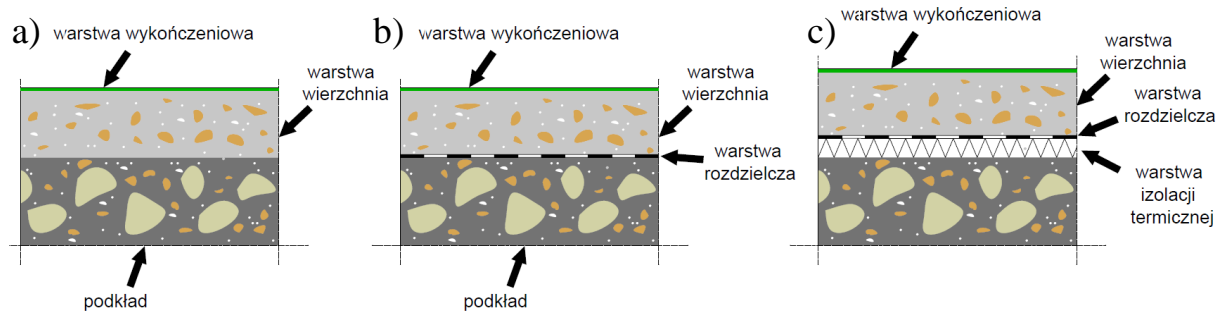
Rys. 4 przedstawia możliwe konfiguracje cementowych warstw wierzchnich w podłogach w zależności od umiejscowienia warstwy wierzchniej.



Rys. 4. Możliwe konfiguracje cementowych warstw wierzchnich w podłogach w sytuacji gdy warstwa wierzchnia stanowi warstwę wykończeniową: a) związana z podkładem, b) na warstwie rozdzielczej, c) na warstwie izolacji termicznej

Na Rys. 4a przedstawiono warstwę wierzchnią związaną z podkładem, na Rys. 4b na warstwie rozdzielczej (np. z folii budowlanej), a na Rys. 4c na warstwie izolacji termicznej (tzw. jastrych pływający). Trzy wymienione powyżej konfiguracje występują również gdy na

cementowej warstwie wierzchniej położono warstwę wykończeniową, co zostało przedstawione na Rys. 5.



Rys. 5. Możliwe konfiguracje cementowych warstw wierzchnich w podłogach w sytuacji gdy warstwa wierzchnia stanowi podłoże pod warstwę wykończeniową: a) związana z podkładem, b) na warstwie rozdzielczej, c) na warstwie izolacji termicznej.

Warto w tym miejscu podkreślić, że w przypadku cementowych warstw wierzchnich w podłogach w sytuacji gdy warstwa wierzchnia jest związana z podkładem zgodnie z [56] ich grubość nie powinna przekraczać 50 mm, z uwagi na problemy z odpowiednim zagęszczeniem zaprawy cementowej w pobliżu strefy zespolenia z podkładem.

Zdaniem autora rozprawy cementowa warstwa wierzchnia w podłogach powinna się charakteryzować odpowiednimi właściwościami. Do podstawowych właściwości warstw wierzchnich należą:

- właściwości świeżej zaprawy (konsystencja, gęstość objętościowa, czasy wiązania),
- właściwości fizyczne (gęstość objętościowa, porowatość),
- właściwości wytrzymałościowe (wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu),
- właściwości adhezyjne (pryczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu),
- właściwości funkcjonalne (ścieralność, przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie).

Zdaniem autora rozprawy, o wydajności mechanicznej cementowych warstw wierzchnich w podłogach decydują przede wszystkim właściwości wytrzymałościowe, adhezyjne i funkcjonalne.

Podstawową właściwością z uwagi na trwałość i wydajność mechaniczną cementowej warstwy wierzchniej w podłogach [73] jest przyczepność przy odrywaniu tej warstwy od podkładu betonowego. Zgodnie z normą [37] powinna ona wynosić minimum 0,5 MPa dla

cementowych warstw wierzchnich nowobudowanych oraz 1,5 MPa dla cementowych warstw wierzchnich naprawczych. W praktyce budowlanej do wykonywania warstw wierzchnich nowobudowanych najczęściej wykorzystywane są zaprawy cementowe zwykłej wytrzymałości. Z kolei w przypadku warstw wierzchnich naprawczych stosowane są coraz częściej zaprawy wysokiej wytrzymałości tj. o wytrzymałości na ściskanie powyżej 60 MPa i wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu powyżej 7 MPa.

W celu poprawy przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu stosuje się przede wszystkim przygotowanie mechaniczne powierzchni podkładu betonowego (zwiększające efektywną powierzchnię rozwinięcia), usunięcie mleczka cementowego z powierzchni podkładu, powierzchniowe odkrycie kruszywa podkładu, wzmacnianie powierzchniowe podkładu betonowego środkami szepnymi, dodatki do zaprawy stanowiącej warstwę wierzchnią.

Z kolei, mając na uwadze wymogi użytkowe, ale również trwałość i wydajność mechaniczną, cementowe warstwy wierzchnie powinny posiadać odpowiednie właściwości wytrzymałościowe i funkcjonalne [159], między innymi takie jak przedstawiono w Tab. 1.

Tab. 1. Zestawienie klas wydajności mechanicznej odpowiadających podstawowym właściwościom cementowych warstw wierzchnich w podłogach (opracowanie własne na podstawie [104])

Podstawowe właściwości cementowych warstw wierzchnich	Klasy wydajności mechanicznej												
Właściwości wytrzymałościowe	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]												
	C5	C7	C12	C16	C20	C25	C30	C35	C40	C50	C60	C70	C80
	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]												
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F10	F15	F20	F30	F40	F50
Właściwości adhezyjne	Przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu [MPa]												
	B0,2	B0,5	B1,0	B1,5	B2,0								
Właściwości funkcjonalne	Ścieralność (cm³/50cm²)												
	A22	A15	A12	A9	A6	A3	A1,5						
	Przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie [MPa]												
	H0,2	H0,5	H1,0	H1,5	H2,0								

W literaturze [104], [31],[64] można wyróżnić kombinacje zastosowań cementowych warstw wierzchnich w zależności od ich wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Zależność taka została przedstawiona w Tab. 2 gdzie zaznaczono kombinacje najczęściej stosowanych cementowych warstw wierzchnich. Jak podano w [31] cementowe warstwy wierzchnie wytrzymałości na ściskanie powyżej 60 MPa oraz wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu powyżej 7 MPa uznawane są za warstwy wierzchnie wysokiej wytrzymałości. W tabeli poniżej zostały one oznaczone kolorem zielonym. Z kolei warstwy oznaczone symbolem (X) są według rzadko wykorzystywane w praktyce według [31].

Tab. 2. Przykładowe kombinacje warstw wierzchnich w zależności od klasy wytrzymałości na ściskanie i klasy wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (na podstawie [64])

Klasa wytrzymałości na ściskanie	Klasa wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu							
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	≥ F10
≥ C60							(X)	X
C50						(X)	X	
C40					X	(X)	X	X
C35					X	X	X	
C30			(X)	X	X	X		
C25			X	X	X			
C20			X	X				
C16		X	X					
≤ C12	X							

Legenda: X - zastosowanie częste w praktyce, (X) - zastosowanie rzadkie w praktyce

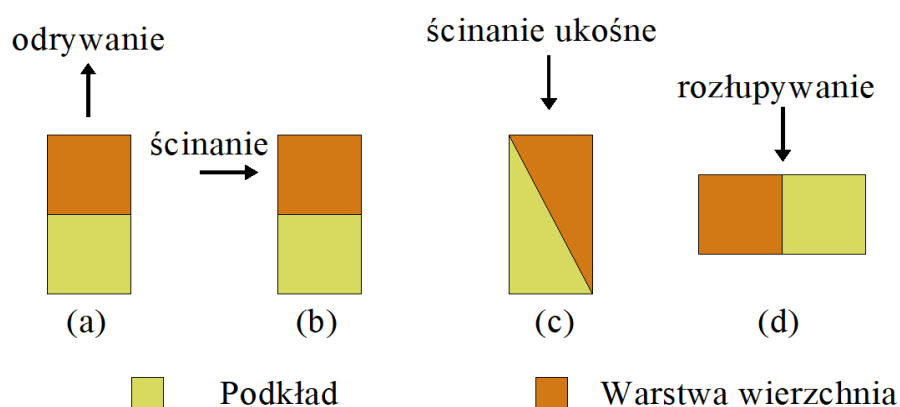
W celu uzyskania wymienionych wcześniej właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych i funkcjonalnych cementowych warstw wierzchnich w podłogach na wymaganym poziomie stosuje się zabiegi dodatkowe takie jak między innymi teksturowanie lub przygotowanie mechaniczne powierzchni podkładu, wzmacnianie zaprawy warstwy wierzchniej zbrojeniem rozproszonym (włókna), utwardzania powierzchniowej warstwy wierzchniej (np. stosując utwardzacze mineralne, metaliczne), impregnowanie powierzchniowe warstwy wierzchniej czy stosowanie dodatków do zaprawy warstwy wierzchniej.

W związku z tym, że metody badania właściwości świeżej zaprawy, a także metody badania właściwości fizycznych i wytrzymałościowych są bardzo dobrze znane i opisane w literaturze, to w dalszej części rozpoznania literaturowego umówiono metody

wykorzystywane do badania właściwości adhezyjnych i funkcjonalnych cementowych warstw wierzchnich w podłogach oraz krótko metodę skaningowej mikroskopii elektronowej.

3.2. Metody badania właściwości adhezyjnych cementowej warstwy wierzchniej

W zależności od wymagań jakie stawia się cementowej warstwie wierzchniej, w celu określenia jej właściwości adhezyjnych należy dobrać odpowiednią metodę badawczą [110]. Ze względu na kierunek przykładania obciążenia metody badawcze zgodnie z [89] można podzielić na cztery główne grupy. Rys. 6 przedstawia najczęściej stosowane metody badania zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem sklasyfikowane w pracy [147].



Rys. 6. Najczęściej stosowane metody badania zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem przy: a) odrywaniu, b) ścinaniu, c) ścinaniu ukośnym, d) rozłupywaniu (na podstawie [147])

Pierwsza grupa metod przedstawiona na Rys. 6a zakłada badanie zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem przy odrywaniu (ang. *pull-off*). Druga grupa zakłada badanie zespolenia przy ścinaniu (ang. *direct shear*) i została przedstawiona na Rys. 6b. Trzecia grupa, przedstawiona na Rys. 6c, zakłada badanie zespolenia przy ścinaniu ukośnym (ang. *slant shear*). W tym przypadku warstwa wierzchnia i podkładowa są ustawione pod kątem 30 stopni względem osi obciążenia ściskającego próbkę. Powoduje to powstanie zarówno naprężeń ściskających i ścinających w strefie zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem. Czwarta z metod polega na badaniu zespolenia przy rozłupywaniu (ang. *splitting*). Metoda ta została przedstawiona na Rys. 6d i zakłada obciążenie próbki skupionym obciążeniem ściskającym dokładnie w strefie zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem co powoduje powstanie naprężeń rozciągających w płaszczyźnie w której przyłożone jest obciążenie i zniszczenie

próbki poprzez podzielenie jej na dwie połowy. W praktyce najczęściej stosowaną metodą jest metoda odrywania, której autor zdecydował się poświęcić więcej uwagi w kolejnym punkcie rozprawy.

3.2.1. Badanie przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu metodą odrywania

W metodzie odrywania badanie przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu przeprowadza się poprzez pomiar wartości siły odrywającej stalowy krążek za pomocą siłownika hydraulicznego. Metoda zakłada wykonanie odwiertu rdzeniowego o średnicy $D_f=50$ mm o głębokości pokazanej na Rys. 7, przyklejenie krążka stalowego w miejscu odwiertu oraz oderwanie krążka. Szybkość przyrostu wartości naprężeń odrywających powinna być równa 0,05 MPa/s. Metoda ta umożliwia określenie wartości zespolenia przy odrywaniu korzystając z poniższej zależności:

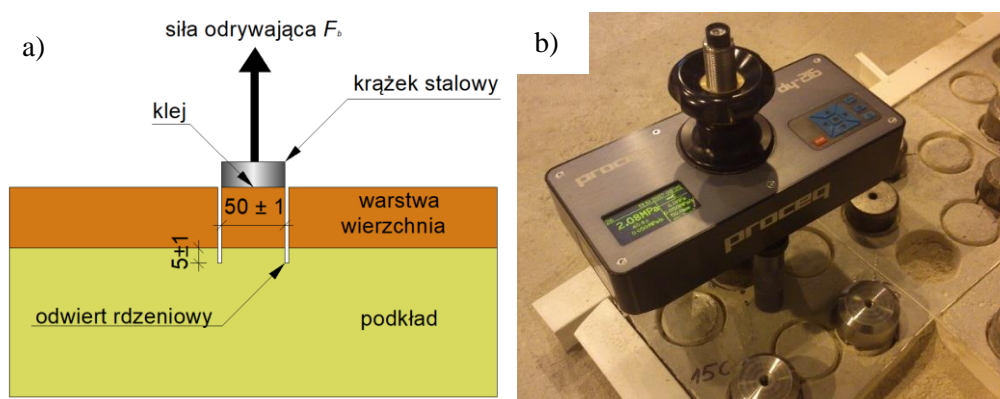
$$f_b = \frac{4F_b}{\pi D_f^2} \quad (1)$$

gdzie:

F_b —obciążenie niszczące (N),

D_f —średnica odwiertu rdzeniowego (m).

Schemat oraz widok stanowiska badawczego do badania ze przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu metodą odrywania przedstawiono na Rys. 7.



Rys. 7. Stanowisko badawcze do badania przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu metodą odrywania: a) schemat , b) widok

Jak już naświetlono wcześniej we wprowadzeniu, z uwagi na trwałość i wydajność mechaniczną cementowej warstwy wierzchniej wymagana jest jej odpowiednia przyczepność

przy odrywaniu f_b z podkładem betonowym wynoszące 0,5 MPa dla warstw wierzchnich nowobudowanych oraz 1,5 MPa dla warstw wierzchnich naprawczych.

3.3. Metody badania właściwości funkcjonalnych cementowych warstw wierzchnich

3.3.1. Badanie ścieralności

Ścieralność jest bardzo istotną właściwością funkcjonalną w szczególności w sytuacji, gdy cementowa warstwa wierzchnia jest jednocześnie warstwą wykończeniową. Według normy PN-EN 13892-1 ścieralność cementowych warstw wierzchnich może być oznaczona z wg. BCA (*ang. British Cement Association*) PN-EN 13892-4, pod naciskiem toczącego się koła (*ang. Rolling Wheel Abrasion – RWA*) PN-EN 13892-5 oraz wg. Boehme'go PN-EN 13892-3. Ścieralność ustalona według każdej z tych metod pozwala na przyporządkowanie badanego materiału do określonej klasy ścieralności (Tab. 3).

Tab. 3 Klasy ścieralności (na podstawie [137])

Ścieralność wg. BCA		Ścieralność pod naciskiem toczącego się koła		Ścieralność wg Boehme'go	
Maksymalna głębokość ubytku materiału [μm]	Klasa ścieralności	Objętość startego materiału [$\text{cm}^3/50\text{cm}^2$]	Klasa ścieralności	Objętość startego materiału [cm^3]	Klasa ścieralności
		22	A22		
600	AR6	15	A15	300	RWA300
400	AR4	12	A12	100	RWA100
200	AR2	9	A9	20	RWA20
100	AR1	6	A6	10	RWA10
50	AR0,5	3	A3	1	RWA1
		1,5	A1,5		

Metoda pomiaru ścieralności wg. BCA polega na poddaniu próbki ścieraniu przy pomocy trzech kół stalowych przymocowanych do urządzenia badawczego. Efektem badania jest wytarcie na powierzchni próbki okręgu o średnicy 225 mm i boku 20 mm na głębokość do

0,8 mm. Badanie wg. BCA przeprowadza się na trzech próbkach o wymiarach 500 mm x 500 mm x 50 mm lub w warunkach naturalnych. Miarą ścieralności jest głębokość ubytku materiału odczytana przy pomocy mikrometru w ośmiu miejscach wskazanych przez szablon.

Z kolei w metodzie badania ścieralności pod naciskiem toczącego się koła próbkę umieszcza się na stole obrotowym, a następnie obciąża ją siłą 2 kN poprzez koło stalowe. Koło to porusza się po powierzchni próbki ruchem wzdłużnym a stół przemieszcza się w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach względem koła. Pole powierzchni próbki na które oddziałuje obciążenie wynosi 1100 cm². Wymiary próbki do badań to 500mm x 500 mm i co najmniej 50 mm grubości, a całkowity czas badania wynosi około 24 godziny. Wynik badań stanowi objętość startego materiału ustalona na podstawie średniej głębokości ubytku.

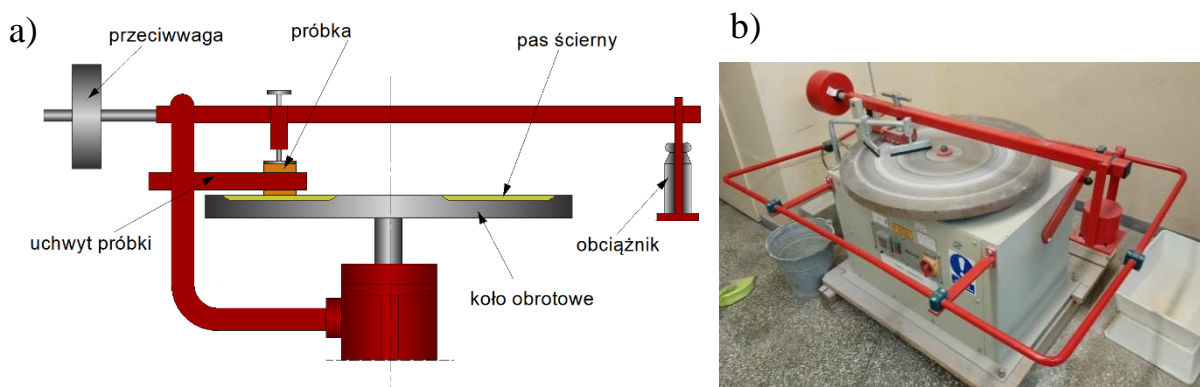
Bardzo dobrze znaną w Polsce i najczęściej stosowaną metodą badania ścieralności jest metoda Boehme’go [61]. Metoda ta polega na poddaniu próbki o wymiarach przekroju 71x71 mm 16 cyklom ścierania na obrotowej tarczy ścierającej (tarczy Boehme’go) [35]. Każdy z cykli składa się z równomiernego rozsypania na tarczy 20 g korundu, zamocowaniu próbki w uchwycie, obciążeniu próbki siłą 294±3 N i poddaniu próbki 22 obrotom na tarczy ścierającej. Po każdym cyklu próbkę należy obrócić o 90 stopni i po każdym 4 cyklach należy ją zważyć. Po 16 cyklach należy określić ścieralność jako utratę masy lub objętości próbki z zależności (2):

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_R} \quad (2)$$

ΔV —ubytek objętości po 16 cyklach (w milimetrach sześciennych),

Δm —ubytek masy po 16 cyklach (w gramach),

ρ_R —gęstość badanej próbki albo w przypadku próbek wielowarstwowych gęstość warstwy ścieranej (w gramach na milimetr sześcienny).



Rys. 8 Schemat (a) oraz widok (b) tarczy Boehme'go (na podstawie [147])

3.3.2. Badanie przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie warstwy wierzchniej

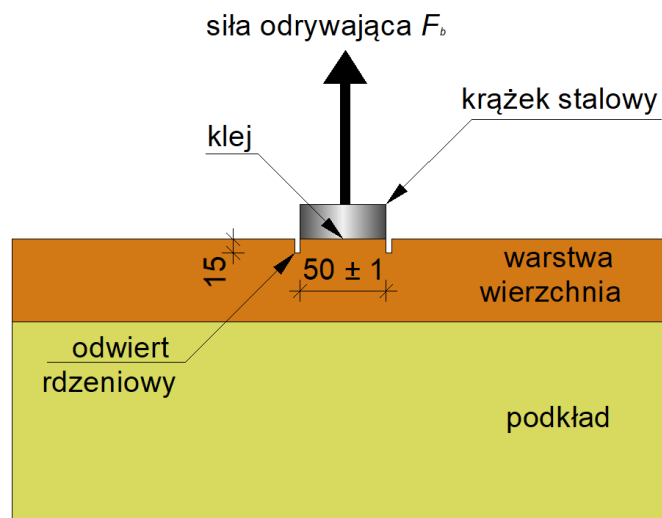
Przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie warstwy wierzchniej jest istotną właściwością funkcjonalną w sytuacji, gdy na powierzchnię warstwy wierzchniej nakładana jest warstwa wykończeniowa. Do jej określenia wykorzystywana jest najczęściej metoda odrywania [36]. Polega ona na wykonaniu odwiertu rdzeniowego o średnicy 50 mm i głębokości około 15 mm, przyklejeniu krążka stalowego o średnicy 50 mm w miejscu odwiertu oraz oderwaniu krążka od warstwy wierzchniej. Schemat metody przy wyznaczaniu przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie warstwy wierzchniej pokazano na Rys. 9. Wartość przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie wyznacza się z zależności (3):

$$f_h = \frac{4F_b}{\pi D_f^2} \quad (3)$$

gdzie:

F_b —obciążenie niszczące (N)

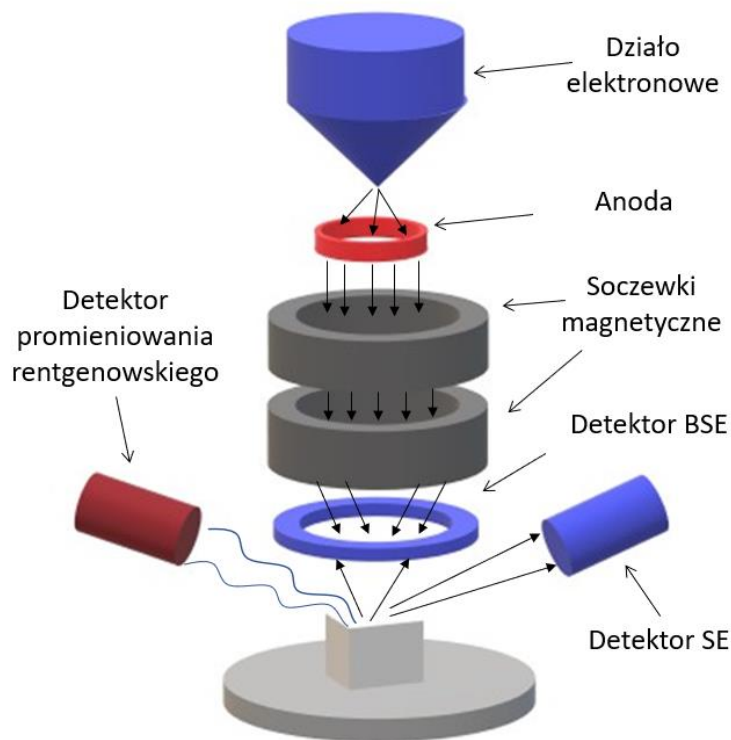
D_f —średnica odwiertu rdzeniowego (m)



Rys. 9. Schemat pomiaru przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie warstwy wierzchniej metodą odrywania (na podstawie [147])

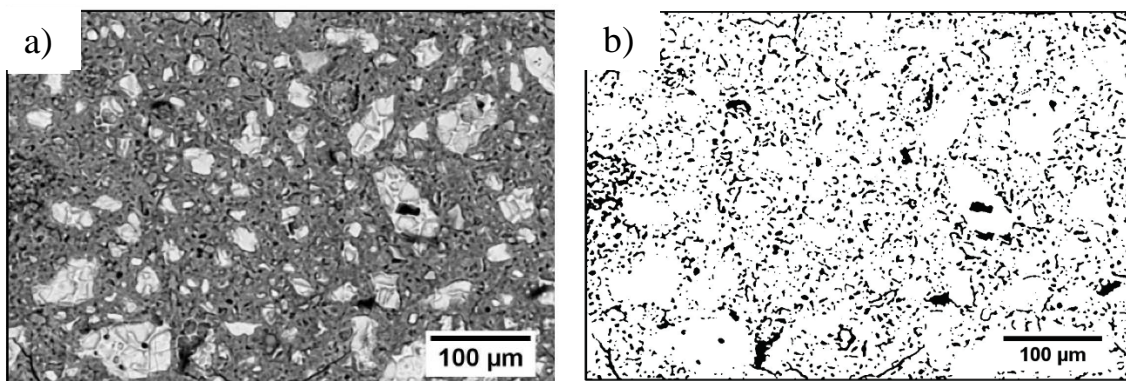
3.4. Ocena struktury zapraw cementowych metodą skaningowej mikroskopii elektronowej

Skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM, *ang. scanning electron microscopy*) jest metodą obrazowania struktury materiału przy wykorzystaniu wiązki elektronów [44], [67]. Rys. 10 przedstawia zasadę działania mikroskopu elektronowego. W pierwszej kolejności elektrony są emitowane przez działło elektronowe oraz są przyspieszane w kierunku anody. Następnie wiązka jest formowana poprzez układ soczewek (zazwyczaj magnetycznych), a jej odchylenie jest możliwe za pomocą cewek. Gdy wiązka trafia w powierzchnię próbki generowane są elektrony wstecznie rozproszone (odbite) i wtórne oraz elektrony Augera i emitowane jest promieniowanie rentgenowskie. Elektrony wstecznie rozproszone (BSE, *ang. backscattered electrons*) to elektrony ulegające odbiciu sprężystemu od jąder atomowych próbki. Elektrony wtórne (SE, *ang. secondary electrons*) są to w dużym stopniu elektrony wyemitowane z atomów blisko powierzchni próbki poprzez zderzenie z elektronami emitowanymi przez działło elektronowe. Emisja promieniowania rentgenowskiego oraz elektronami Augera generowane są z atomów znajdujących się blisko powierzchni próbki. Wiązka elektronów powoduje wybitego elektronu z powłoki wewnętrznej atomu. Następnie na miejsce wybitego elektronu przeskakuje elektron z poziomu o wyższej energii z równoczesną emisją nadmiaru energii (spowodowaną różnicą poziomów energetycznych elektronów) w postaci elektronów Augera, promieniowania rentgenowskiego lub promieniowania z zakresu światła widzialnego. Następnie elektrony wtórne albo odbite docierają do detektora składającego się z scyntylatora zamieniającego energię elektronów na impulsy świetlne oraz fotopowielacza odpowiadającego za wzmocnienie sygnału. Daje to możliwość obserwacji struktury powierzchni próbki.



Rys. 10. Uproszczony schemat działania skaningowego mikroskopu elektronowego

Dodatkowo mikroskop może być wyposażony w system bazujący na spektroskopii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS, *ang. energy dispersive x-ray spectroscopy*) umożliwiającą spektroskopię dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego. Istotą tej metody jest pomiar promieniowania rentgenowskiego emitowanego przy przejściu elektronów z wyższych powłok energetycznych na niższe. Ponieważ energia elektronów na poszczególnych poziomach energetycznych jest cechą charakterystyczną dla każdego pierwiastka, wygenerowana wiązka promieniowania (wynikająca z różnic energii elektronów) jest również charakterystyczna dla danego pierwiastka. W efekcie uzyskuje się obraz spektrum zarejestrowanego promieniowania pozwalające na analizę jakościową i ilościową składu chemicznego badanej próbki. Na Rys. 11 przedstawiono przykładowe obrazy uzyskane za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego.



Rys. 11 Przykładowe obrazy SEM: a) zaprawy warstwy wierzchniej z dodatkiem nanocząstek SnF_2 , b) obraz wysegmentowanych porów (na podstawie [77])

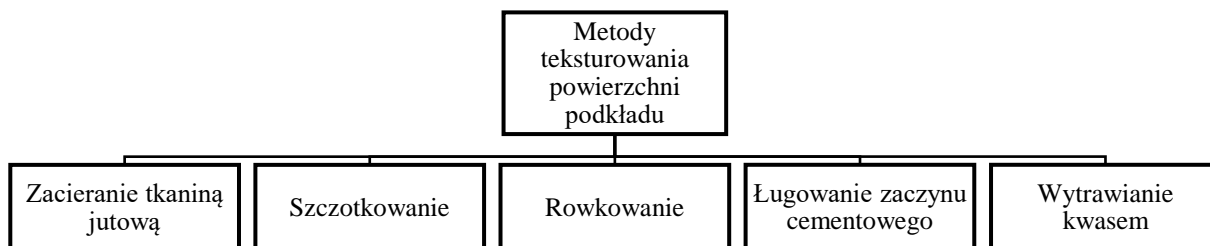
W kolejnej części rozpoznania literatury uwagę poświęcono przeglądowi dotychczasowych działań mających na celu poprawę właściwości adhezyjnych cementowej warstwy wierzchniej w podłogach.

3.5. Przegląd dotychczasowych działań mających na celu poprawę właściwości adhezyjnych cementowej warstwy wierzchniej w podłogach

W celu poprawy właściwości adhezyjnych cementowej warstwy wierzchniej w podłogach stosuje się między innymi teksturowanie powierzchni podkładu betonowego, przygotowanie mechaniczne powierzchni podkładu betonowego (zwiększające efektywną powierzchnię rozwinięcia), wzmacnianie powierzchniowe podkładu betonowego środkami szepnymi oraz dodatki do zaprawy cementowej stanowiącej warstwę wierzchnią.

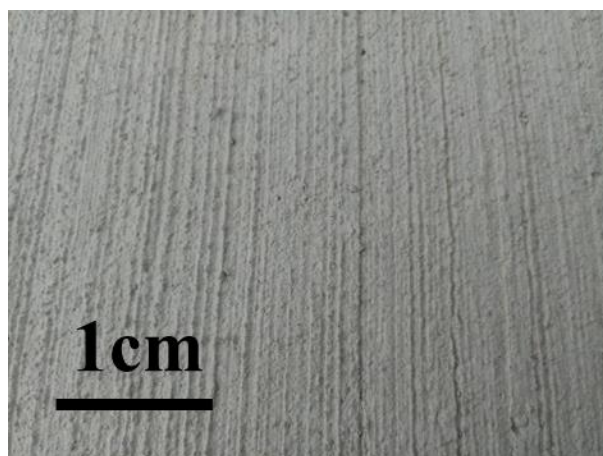
3.5.1. Teksturowanie powierzchni podkładu betonowego

Coraz częściej stosowanym sposobem poprawy przy właściwości adhezyjnych cementowej warstwy wierzchniej w podłogach jest teksturowanie powierzchni podkładu. Ogólny podział metod teksturowania powierzchni podkładu betonowego został przedstawiony na Rys. 12.



Rys. 12. Ogólny podział metod tekstuowania powierzchni podkładu betonowego (na podstawie [147] i [109])

Spośród metod tekstuowania powierzchni podkładu betonowego wymienionych na Rys. 12 na uwagę zasługuje metoda zacierania tkaniną jutową, która polega na mechanicznym ciągnięciu materiału jutowego po powierzchni betonu. Z kolei metoda szczotkowania polega na szczotkowaniu świeżej zaprawy lub betonu przy użyciu metalowych szczotek. Zaletą tej metody jest szybkość tekstuowania powierzchni betonu. Metoda ługowania zaczynu cementowego z powierzchni cementowej warstwy wierzchniej polega na szczotkowaniu lub natryskiwaniu wody, która wymywa niezwiązaną warstwę tej zaprawy. Ponadto po użyciu tej metody powierzchnia może pełnić funkcję dekoracyjną. Metoda rowkowania polega na nacinaniu rowków na powierzchni betonu o głębokości około 6 mm. Metoda wytrawiania kwasem polega na aplikacji roztworu kwasu solnego na powierzchni betonu przy pomocy szczotkowania. Teksturowanie zazwyczaj jest wykonywane w celu wykończenia powierzchni tak, aby na przykład zminimalizować poślizg, czy zwiększyć przyczepność kół pojazdu do powierzchni. Co ciekawe ostatnie badania pokazują, że teksturowanie ostatnio było używane w celu poprawy przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej z żywicy epoksydowej od podkładu betonowego [75] oraz zaprawy cementowej warstwy wierzchniej do podkładu betonowego [117]. Warto zaznaczyć, że w przeciwieństwie do przygotowania mechanicznego powierzchni, teksturowanie odbywa się po ułożeniu i wygładzeniu powierzchni materiału i nie ma zastosowania dla już wykonanych elementów.

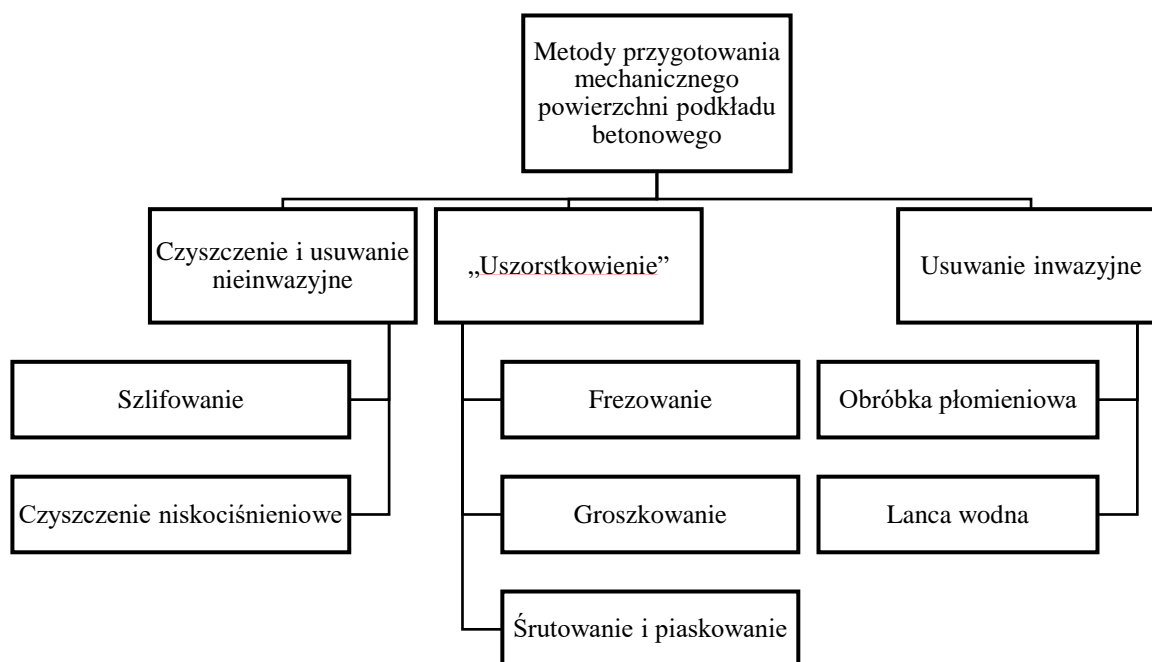


Rys. 13. Przykładowy widok teksturowanej powierzchni podkładu betonowego (na podstawie [109])

3.5.2. Przygotowanie mechaniczne powierzchni podkładu betonowego

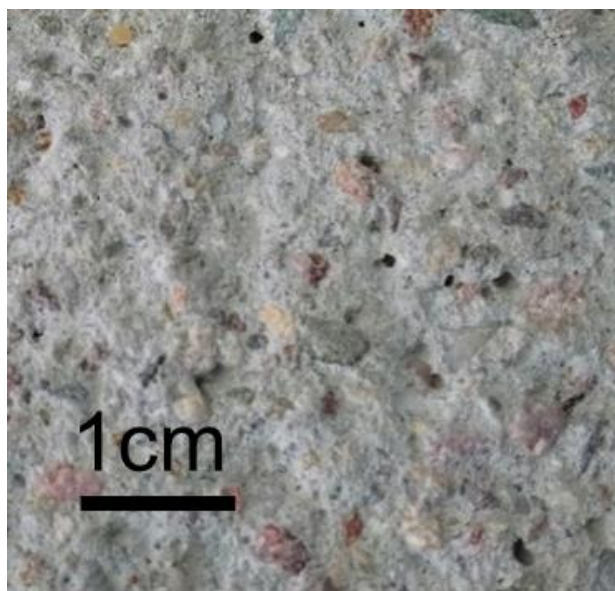
W ostatnich latach wiele badań zostało przeprowadzonych w celu określenia wpływu morfologii powierzchni podkładu betonowego na właściwości adhezyjne cementowych warstw wierzchnich ([113],[1],[17],[47],[23]). Metody pozwalające na określenie morfologii powierzchni podkładu zostały szczegółowo przedstawione i opisane między innymi przez: *Santos i Julio* [124], *Mathia i inni* [84], *Garbacz i inni* [45] oraz *Sadowski i inni* [116]. Obecnie coraz częściej do tego celu stosuje się SEM ([3],[125],[58]).

Generalnie dostępne metody mechanicznej obróbki powierzchni podkładu betonowego mogą być podzielone na trzy główne grupy: metody czyszczące i usuwające nieinwazyjnie, uszorstkowiające, usuwające inwazyjnie. Każda z grup zawiera metody, które różnią się mechanizmem obróbki i dlatego mają szczególne obszary zastosowań. Rys. 14. przedstawia podział metod przygotowania mechanicznego powierzchni podkładu betonowego ze względu na jego typ.



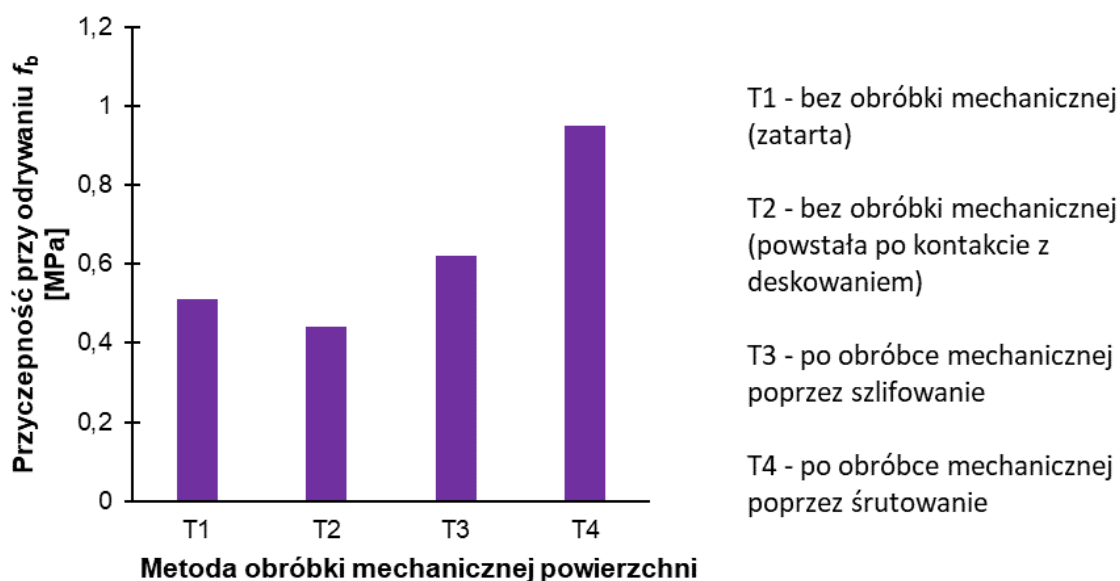
Rys. 14. Podział metod przygotowania mechanicznego powierzchni podkładu betonowego (na podstawie [147] i [109])

Przykładowy widok powierzchni podkładu betonowego po obróbce mechanicznej poprzez śrutowanie pokazano na Rys. 15.



Rys. 15 Przykładowy widok powierzchni podkładu betonowego po obróbce poprzez śrutowanie (na podstawie [147])

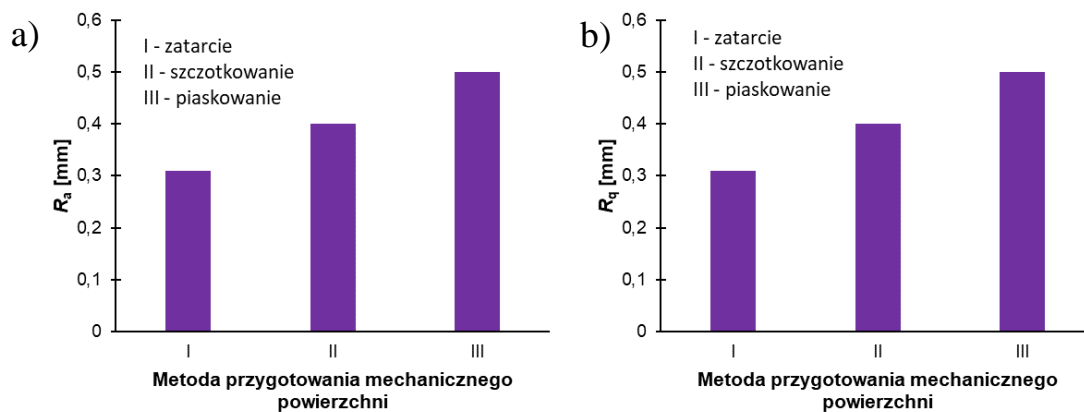
Grupa metod czyszczących i nieinwazyjnych zawiera szlifowanie oraz czyszczenie niskociśnieniowe. Szlifowanie odsłania drobne ziarna kruszywa poprzez usunięcie mleczka cementowego, luźnych fragmentów materiału cementowego i innych nieczystości. Z kolei czyszczenie niskociśnieniowe pozwala ona na usunięcie zanieczyszczeń rozpuszczalnych w wodzie oraz kruchego materiału cementowego z powierzchni. Druga grupa metod („uszorstkowanie”) zawiera frezowanie, groszkowanie oraz śrutowanie i piaskowanie. Frezowanie pozwala otrzymać regularny profil równoległych rowków na powierzchni, usunięcie całego mleczka cementowego oraz poziomowanie dużych nierówności (do 20mm). Groszkowanie polega na użyciu maszyn pneumatycznych takich jak młoty, różne końcówki tłokowe itp. Metody te usuwają luźny materiał cementowy, mleczko cementowe i zabrudzenia z powierzchni warstwy wierzchniej i powierzchniowo odsłaniają kruszywo grube. Morfologia powierzchni po obróbce zależy od granulacji użytego materiału ściernego. Grupa metod inwazyjnych zawiera obróbkę płomieniową oraz lance wodną. Ostatnie badania pokazują, że śrutowanie powierzchni podkładu betonowego zdecydowanie najkorzystniej poprawia właściwości adhezyjne cementowej warstwy wierzchniej, w szczególności przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu betonowego ([121],[123],[46],[24],[152]). Pełny opis sposobów przygotowania mechanicznego powierzchni oraz ich mechanizmów został przedstawiony między innymi w pracach [98] i [99]. Z kolei Rys. 16 przedstawia wpływ sposobu przygotowania powierzchni podkładu betonowego na przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od tego podkładu.



Rys. 16. Wpływ metody przygotowania mechanicznego powierzchni podkładu betonowego na przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu (na podstawie wyników przedstawionych w [44])

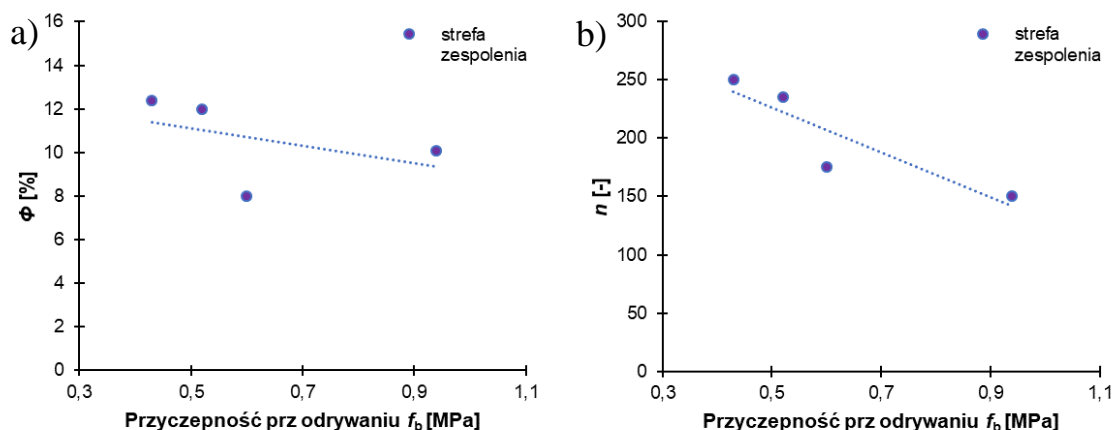
Rys. 16 przedstawia, że samo zwiększenie efektywnej powierzchni rozwinięcia nie powoduje znacznego zwiększenia przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu w przypadku powierzchni zatartej i z powierzchni powstałej po kontakcie z deskowaniem (T1 i T2). Ponadto, samo odsłonięcie kruszywa (na powierzchni podkładu) nie powoduje widocznego wzrostu wartości przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu w przypadku powierzchni szlifowanej (T3). Tylko jednoczesne zwiększenie efektywnej powierzchni rozwinięcia oraz odsłonięcie kruszywa znacząco zwiększa poziom przyczepności co można zauważyć w przypadku powierzchni śrutowanej (T4).

Franck i De Belie [42] wykazali z kolei, że obróbka mechaniczna powierzchni podkładu betonowego wpływa na wartości parametrów R_a i R_q (Rys. 17) Z Rys. 17 wynika, że wartości parametrów średniej arytmetycznej wysokości (R_a) i odchylenia wartości średniokwadratowej (R_q) powierzchni podkładu betonowego poddanego piaskowaniu są o około 20 % wyższe w stosunku do powierzchni szczotkowanej i o około 70 % większe niż dla powierzchni zatartej.



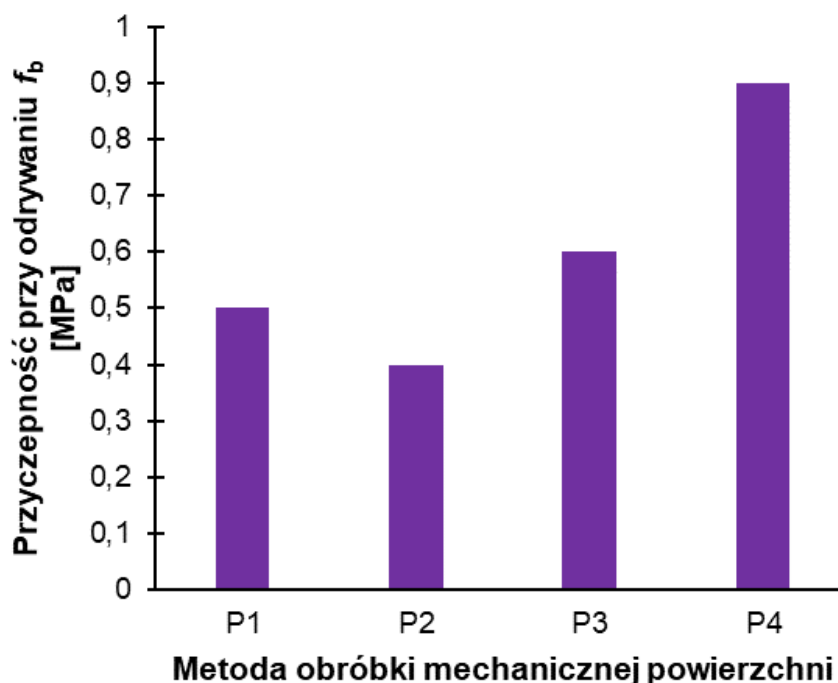
Rys. 17. Wpływ obróbki mechanicznej powierzchni podkładu betonowego na wartość parametrów: a) średniej arytmetycznej wysokości (R_a) powierzchni, b) odchylenia wartości średniokwadratowej (R_q) powierzchni (na podstawie wyników przedstawionych w [42])

Badania pokazują, że wraz ze zwiększaniem się udziału frakcyjnego porów Φ i liczby porów w strefie zespolenia wartość przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu zmniejsza się ([120],[75],[117],[119],[86]). Jest to związane z przygotowaniem mechanicznym powierzchni podkładu przed nałożeniem cementowej warstwy wierzchniej. Powierzchnia dla której zaobserwowano największy wzrost zespolenia to powierzchnia poddana śrutowaniu. Jest to skutkiem tego, że śrutowanie powoduje, że materiał warstwy wierzchniej lepiej przylega do podkładu i dzięki temu mniej porów występuje w strefie zespolenia. Zależność pomiędzy całkowitym udziałem frakcyjnym porów w strefie zespolenia i liczbą porów, a przyczepnością przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu została pokazana na Rys. 18.



Rys. 18. Zależność przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu od udziału frakcyjnego porów (a) oraz liczby porów (b): IZ – strefa zespolenia (na podstawie wyników przedstawionych w [120])

Znane jest, że usunięcie mleczka cementowego z powierzchni podkładu betonowego poprawia właściwości adhezyjne cementowej warstwy wierzchniej ([132],[133],[71]). Rys. 19 przedstawia zależność pomiędzy przyczepnością przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu i metodą obróbki powierzchni podkładu (usuwająca i nieusuwająca mleczka cementowego).



Rys. 19. Zależność przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu od metody obróbki powierzchni (na podstawie badań [121], oznaczenia powierzchni: P1 – zatarta, P2 powstała po kontakcie z formą, P3 – szlifowana, P4 – śrutowana)

Jak wynika z Rys. 19 metody które usuwają mleczko cementowe np. szlifowanie (P3) albo śrutowanie (P4) mogą znacząco zwiększyć poziom przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu (w porównaniu do metod, które go nie usuwają).

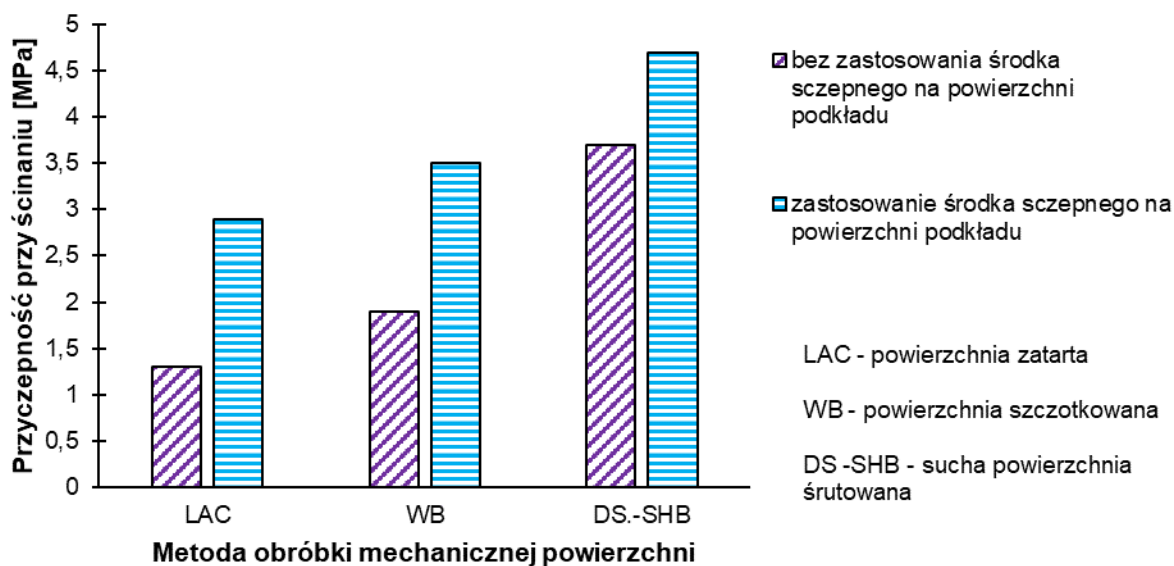
W pracy [121] zastosowano metodę skanowania laserowego 3D do skorelowania udziału odsłoniętego kruszywa A_A widocznego na powierzchni podkładu betonowego i będącego efektem metody obróbki do wartości przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu. Cztery rodzaje powierzchni betonowych: zatarta, utworzona po zetknięciu z deskowaniem, szlifowana oraz śrutowana zostały poddane badaniom przy użyciu mikroskopu optycznego. W ten sposób można było stwierdzić, że udział odsłoniętego kruszywa A_A dla powierzchni śrutowanej na całej powierzchni był najwyższy w porównaniu z powierzchniami poddanymi obróbce w inny sposób. Jednak korelacja między udziałem odsłoniętego kruszywa A_A , które było widoczne na powierzchni podkładu betonowego, a przyczepnością przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu była niemożliwa do uzyskania. Z drugiej strony wykazano, że wzrost udziału odsłoniętego kruszywa A_A wraz ze wzrostem parametru S_{dr} (rozwiniętym stosunkiem pola międzyfazowego powierzchni) powoduje wzrost wartości przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu. Na tej podstawie utworzono następującą relację:

$$f_b(S_{dr}; A_A) = 0.32 + 0.043 S_{dr} + 0.0138A_A \quad (4)$$

To równanie pokazuje, że metody obróbki, które zwiększają tylko wartość parametru S_{dr} (powierzchnia zatarta i powierzchnia utworzona po kontakcie z deskowaniem), nie powodują wzrostu przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu. Ponadto wzrost tylko udziału odsłoniętego kruszywa A_A nie powoduje wzrostu przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu, czego przykładem jest powierzchnia podkładu betonowego przygotowana poprzez zatarcie). Tylko jednoczesny wzrost udziału odsłoniętego kruszywa A_A , na powierzchni podkładu betonowego wraz ze wzrostem parametru S_{dr} (rozwiniętym stosunkiem pola międzyfazowego powierzchni), znacznie zwiększa wartość przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu. Można to zaobserwować w przypadku powierzchni podkładu betonowego przygotowanego poprzez śrutowanie.

3.5.3. Wzmacnianie powierzchniowe podkładu betonowego środkami szepnymi

Wyniki badań dostępne w literaturze wskazują również, że zastosowanie środka szepnego przed nałożeniem cementowej warstwy wierzchniej na powierzchnię podkładu betonowego poprawia właściwości adhezyjne cementowej warstwy wierzchniej ([122],[155],[156],[16]). Rys. 20 pokazuje wpływ zastosowania środka szepnego na zespolenie warstwy wierzchniej do podkładu zależności od zastosowanej metody obróbki mechanicznej powierzchni podkładu.

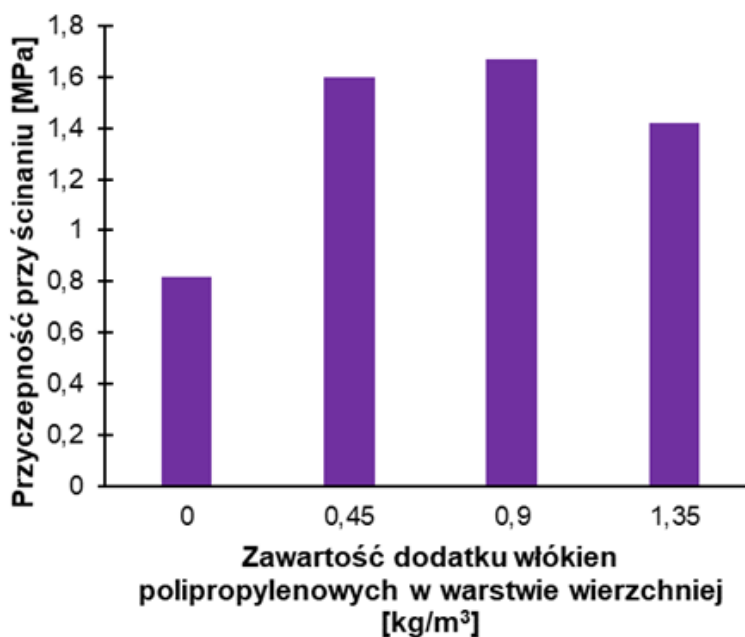


Rys. 20. Zależność przyczepności przy ścinaniu warstwy wierzchniej od podkładu od użytego środka szepnego i metody obróbki powierzchni podkładu (na podstawie wyników przedstawionych w pracy [122]).

Jak wynika z Rys. 20, zastosowanie środka szepnego zwiększyło prawie dwukrotnie wartość przyczepności przy ścinaniu między warstwami dla powierzchni zatartej (LAC) oraz szczotkowanej (WB). Z kolei w przypadku suchej powierzchni śrutowanej (DS-SHB) wpływ zastosowania środka szepnego był mniejszy w porównaniu z innymi powierzchniami. W ostatnich latach środki szepne są również popularne w celu zwiększenia przyczepności przy odrywaniu warstw wierzchnich wykonanych z tynków gipsowych od podkładów wykonanych z elementów murowych [76].

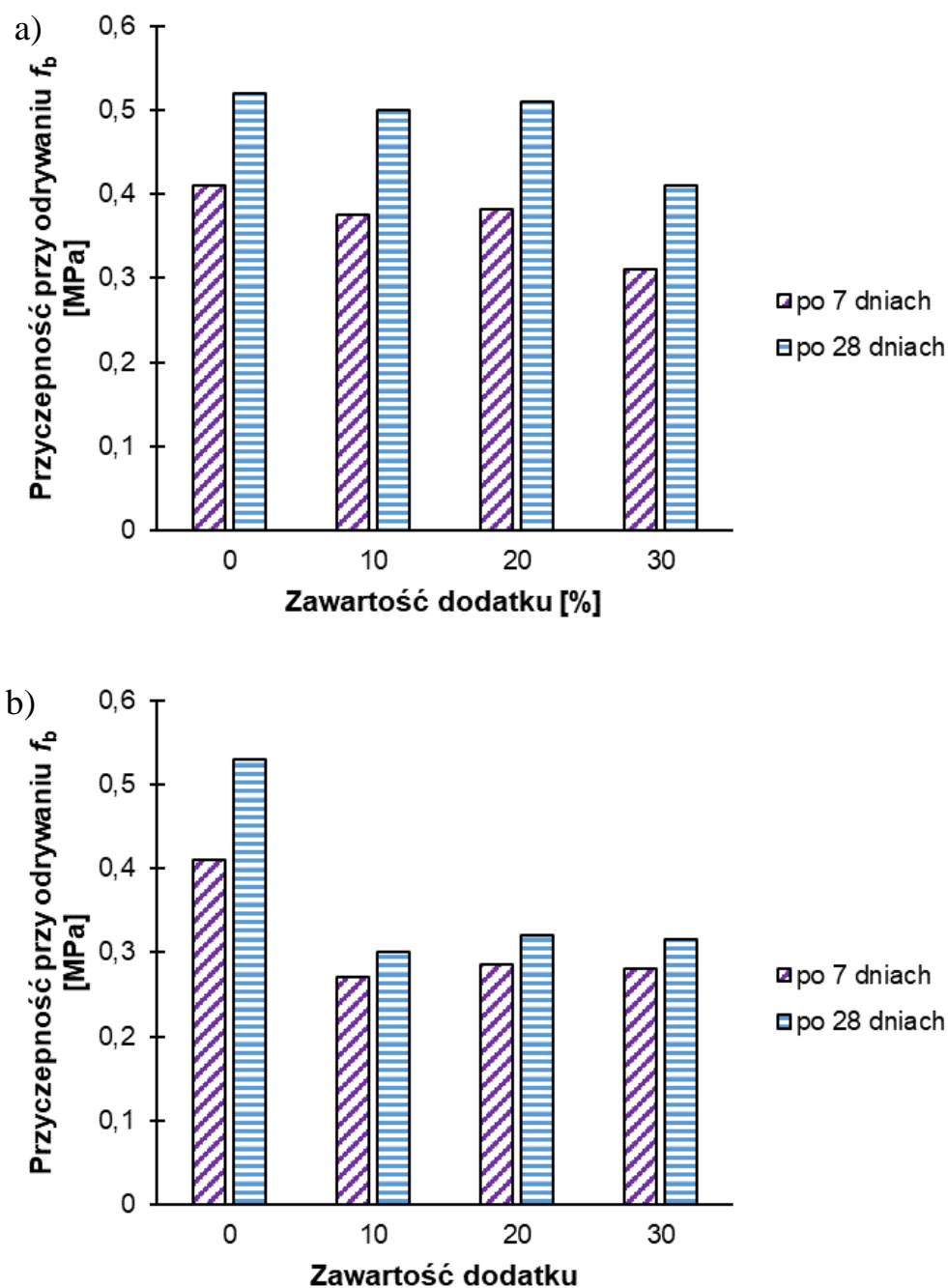
3.5.4. Stosowanie dodatków do zaprawy cementowej stanowiącej warstwę wierzchnią

Wyniki dotychczasowych badań w literaturze wskazują, że stosowanie dodatków w postaci pyłu krzemionkowego, metakaolinu, krótkich włókien węglowych, włókna polipropylenowego, proszku styrenu / akrylu, fosforanu magnezu i popiołu lotnego w zaprawie cementowej warstwy wierzchniej jest korzystne pod względem właściwości adhezyjnych cementowej warstwy wierzchniej ([87], [85], [118], [33], [106], [81], [52], [151], [126], [144]). Z kolei użycie mączki kwarcowej i szklanej jako dodatku do zaprawy cementowej warstwy wierzchniej nie wpływa pozytywnie na zespolenie warstwy wierzchniej z podkładem ([115], [112]). Rys. 21 przedstawia wyniki badań przyczepności przy ścinaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu w zależności od zawartości włókien polipropylenowych w warstwie wierzchniej. Można zauważyć, że dodanie włókien polipropylenowych do warstwy wierzchniej w ilości 0,45 i 0,9 kg/m³ znacznie poprawiło poziom przyczepności przy ścinaniu warstwy wierzchniej od podkładu (około dwukrotnie) w porównaniu do warstwy wierzchniej bez dodatku włókien polipropylenowych.).



Rys. 21. Wyniki badań przyczepności przy ścinaniu warstwy wierzchniej od podkładu w zależności do zawartości włókien polipropylenowych w warstwie wierzchniej (opracowanie własne na podstawie wyników badań przedstawionych w pracy [144]).

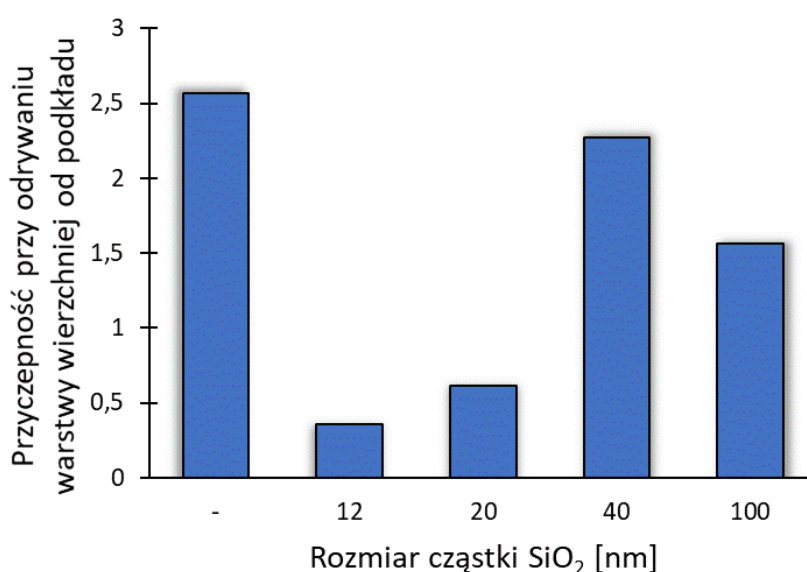
Z kolei z Rys. 22 przedstawia wpływ dodatku mączki kwarcowej (Rys. 22a) oraz mączki kwarcowo-skaleniowej (Rys. 22b) modyfikującej zaprawę cementową warstwy wierzchniej na przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu betonowego.



Rys. 22. Wpływ dodatków mineralnych do cementowej warstwy wierzchniej na jej przyczepność przy odrywaniu od podkładu betonowego: a) mączka kwarcowa, b) mączka kwarcowo-skaleniowa (opracowanie własne na podstawie wyników badań przedstawionych w pracy [115])

Jak wynika z Rys. 22a, dodanie do warstwy wierzchniej 10% i 20% mączki kwarcowej w stosunku do masy cementu nie powoduje istotnej zmiany wartości przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu po 7 i 28 dniach od zabetonowania warstwy wierzchniej. Z kolei dodanie 30% mączki spowodowało spadek wartości przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu o około 15% po 7 dniach i o około 20% po 28 dniach od zabetonowania warstwy wierzchniej. Z kolei z Rys. 22b wynika, że dodanie mączki kwarcowo-skalenkowej do zaprawy cementowej warstwy wierzchniej w każdej ilości spowodowało około dwukrotny spadek wartości przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu.

Rys. 23 przedstawia z kolei wpływ wielkości nanocząstek SiO_2 na przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu betonowego. Wykazano, że zastosowanie dodatku nanocząstek SiO_2 pogarsza właściwości adhezyjne cementowych warstw wierzchnich, w tym jej przyczepność przy odrywaniu od podkładu. Jednak na uwagę zasługuje fakt, że zniszczenie w tym przypadku nastąpiło w podkładzie betonowym, co świadczy o tym, że beton w podkładzie miał zdecydowanie niższą wytrzymałość na ścislenie niż zaprawa cementowa warstwy wierzchniej [57].



Rys. 23. Wpływ wielkości nanocząstek SiO_2 na przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu betonowego [57] (zniszczenie w podkładzie betonowym)

3.6. Przegląd stosowanych sposobów poprawy właściwości wytrzymałościowych i funkcjonalnych cementowej warstwy wierzchniej

W zależności od wymagań funkcjonalnych obiektu, a także jego trwałości i wydajności mechanicznej, cementowe warstwy wierzchnie powinny posiadać odpowiednią wytrzymałość oraz właściwości funkcjonalne ([136],[62]). W wielu przypadkach niespełnienie wymagań technologicznych i technicznych ma negatywny wpływ na stan posadzek z zaprawy cementowej [60]. Aby uzyskać właściwości na wymaganym poziomie, stosuje się następujące dodatkowe czynności, które pokazano na Rys. 24.



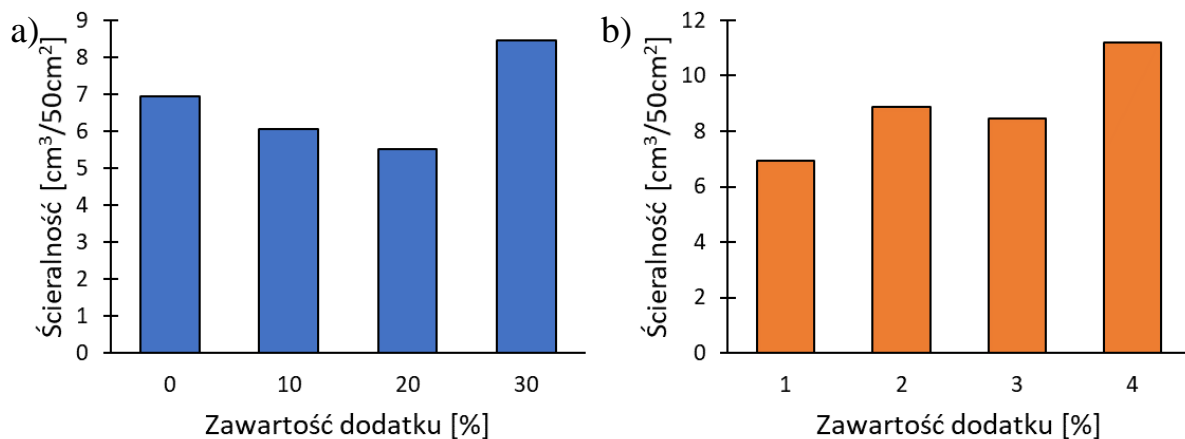
Rys. 24 Stosowane sposoby poprawy właściwości funkcjonalnych warstwy wierzchniej.

Różne rodzaje włókien, takie jak stalowe, polipropylenowe, polietylenowe, nylonowe, aramidowe czy poliesterowe są powszechnie stosowane jako dodatek do betonów i zapraw cementowych w celu poprawy ich właściwości wytrzymałościowych i funkcjonalnych ([7],[19],[74],[91],[10],[6]). Jednak najczęściej stosowanymi dodatkami do cementowych warstw wierzchnich są włókna polipropylenowe [70]. W pracy [144] stwierdzono, że dodatek włókien polipropylenowych do betonu poprawia między innymi jego wytrzymałość na ściskanie i zginanie, odporność na uderzenia i odporność na ścieranie. Z kolei *Song i Hwang* [139] wskazali, że dodanie włókna stalowego do betonu zwiększa jego wytrzymałość na ściskanie nawet o 15,3%, a jego wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu nawet o 98,3%. W większości przypadków wyższa wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej skutkuje również jej wyższą odpornością na ścieranie oraz przypowierzchniową wytrzymałością na rozciąganie ([5],[69],[130],[129]). Pomimo tej zależności wartość

wytrzymałości na ściskanie może się różnić w górnej, środkowej i dolnej strefie warstwy wierzchniej ([18],[68]), co zostało potwierdzone w badaniach wykorzystujących metody ultradźwiękowe ([141],[142]). Na wytrzymałość na rozciąganie, skurcz, moduł sprężystości i relaksacji przy rozciąganiu warstwy wierzchniej w znacznym stopniu wpływają warunki pielęgnacji ([71],[14],[92],[101]). Z literatury wynika również, że na właściwości stwardniałej zaprawy lub betonu może wpływać sposób układania mieszanki ([32],[80],[20]).

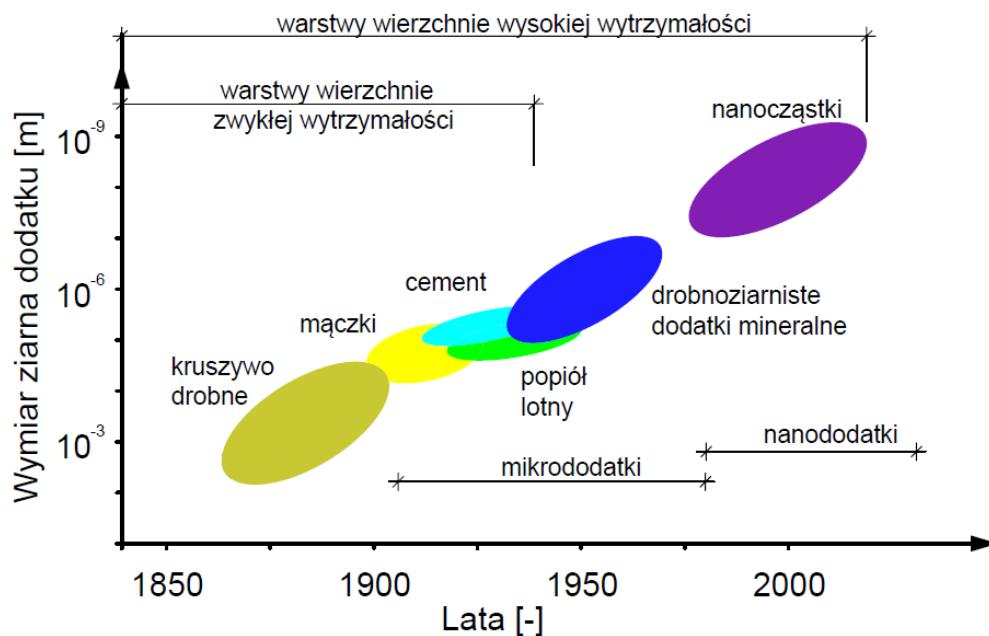
Kolejną metodą poprawy właściwości funkcjonalnych warstwy wierzchniej jest jej utwardzanie powierzchniowe. Stwierdzono, że wiele utwardzaczy, takich jak utwardzacz z kruszywa mineralnego lub metalicznego (żelazo, kwarc, krzemionka, itp.), włókna polipropylenowe i włókna metaliczne ([55],[51],[83],[39],[97]), szczególnie zwiększają odporność na ścieranie powierzchni betonu i zaprawy. Zastosowany sposób wykończenia i modyfikacji materiału warstwy wierzchniej za pomocą mikro/nano materiałów wpływa nie tylko na odporność na ścieranie ([49],[50],[59],[57],[128],[134],[2],[105],[96]), ale także na różne specjalne właściwości, takie jak odporność na starzenie w wysokich temperaturach, samooczyszczanie, oczyszczanie powietrza, odporność na sól do odladzania, mrozoodporność ([72],[30],[88],[12],[11]). Impregnacja powierzchni powłoki różnymi powłokami (np. epoksydowe, akrylowe, poliuretanowe, cementowe, nanokompozyty polimerowe / gliniaste) może zwiększyć jej trwałość, a także poprawić wiele właściwości funkcjonalnych, takich jak odporność chemiczna, przepuszczalność chlorków, twardość, nieprzepuszczalność, odporność na ścieranie, odporność na ciepło, skurcz itp. ([127],[22],[102],[43],[4],[28],[29],[21],[90],[100]).

Rys. 25 przedstawia wpływ dodatku mączki kwarcowej oraz mączki kwarcowo-skaliowej na ścieralność zaprawy cementowej. Wykazano na podstawie badań, że zastosowanie drobnoziarnistych dodatków mineralnych bazujących na SiO_2 w ilości do 20 % masy cementu korzystnie wpływa na ścieralność zaprawy cementowej, a dodatek bazujący na Al_2O_3 pogarsza ją [105].



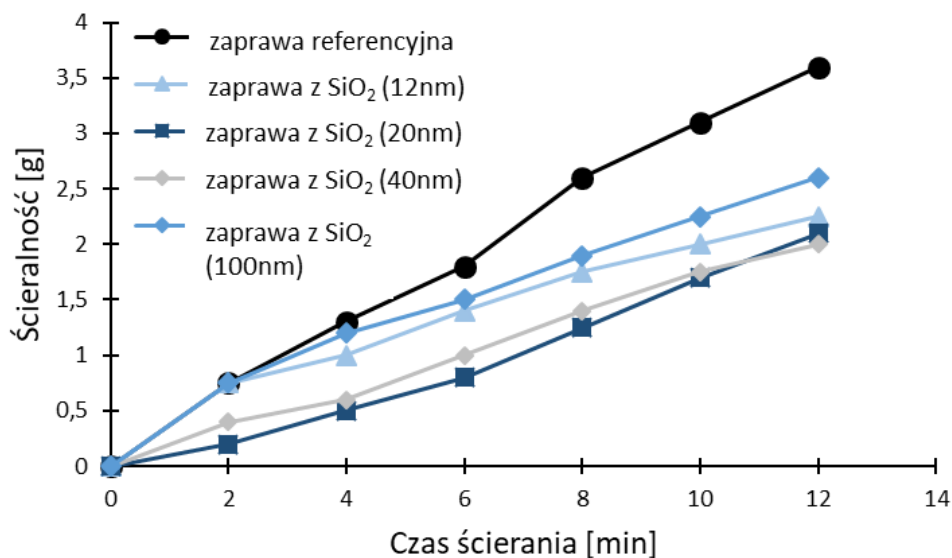
Rys. 25. Wpływ dodatków mineralnych na ścieralność zaprawy cementowej:
 a) mączka kwarcowa, b) mączki kwarcowo-skalieniowa
 (opracowanie własne na podstawie [105])

W literaturze sygnalizuje się, że w przypadku zapraw warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości dodatek nanocząstek może poprawić właściwości tych warstw. Na Rys. 26 przedstawiono na podstawie [25] jak stopniowo następowało zmniejszanie wymiaru ziaren dodatków do warstw wierzchnich na przestrzeni czasu.



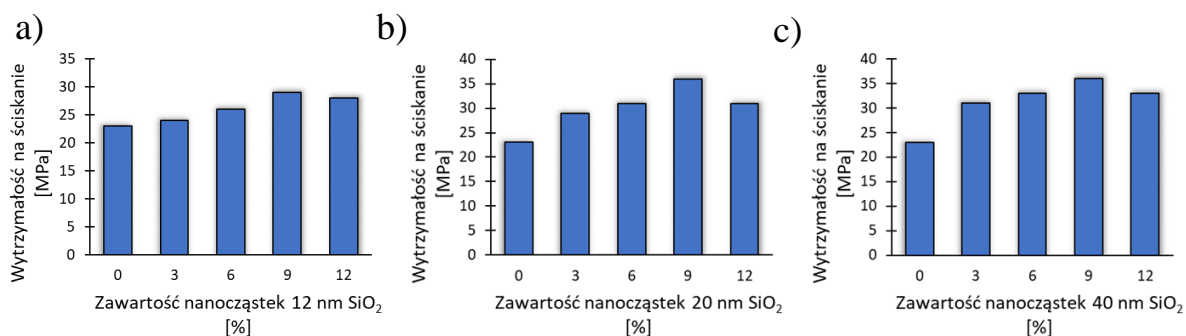
Rys. 26 Zmniejszenie wymiaru ziaren dodatków używanych do wykonania cementowych warstw wierzchnich na przestrzeni czasu (opracowanie własne na podstawie [25])

Z kolei na Rys. 27 przedstawiono wpływ dodatku nanocząstek SiO₂ na ścieralność zapraw. Wykazano, że zastosowanie dodatku nanocząstek SiO₂ o frakcjach 12, 20, 40 oraz 100 nm poprawia ścieralność zapraw w stosunku do zaprawy bez dodatku nanocząstek (Pulngern i inni [57]).



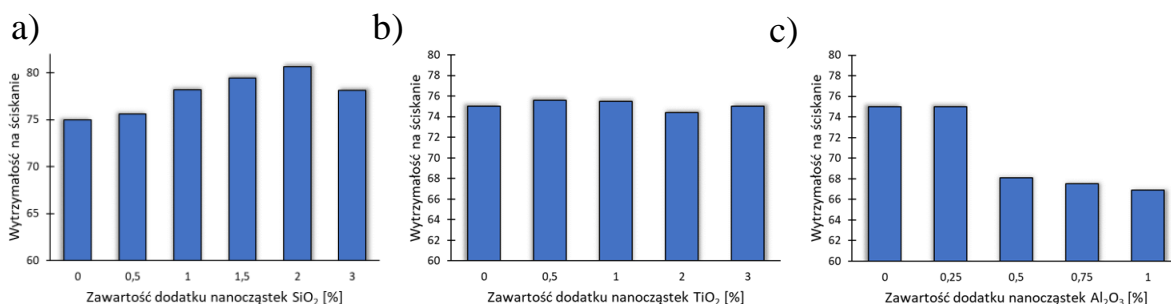
Rys. 27. Ścieralność zapraw z dodatkiem nanocząstek SiO₂ (opracowanie własne na podstawie [57])

W tych samych badaniach [57] wykazano również, że zastosowanie dodatku nanocząstek SiO₂ poprawia właściwości wytrzymałościowe warstwy wierzchniej, w tym jej wytrzymałość na ściskanie. Rys. 28 przedstawia jak wzrasta wytrzymałość na ściskanie w zależności od wielkości zastosowanych nanocząstek. Największy wzrost dla każdej frakcji zauważono dla dodatku nanocząstek w ilości 9%.



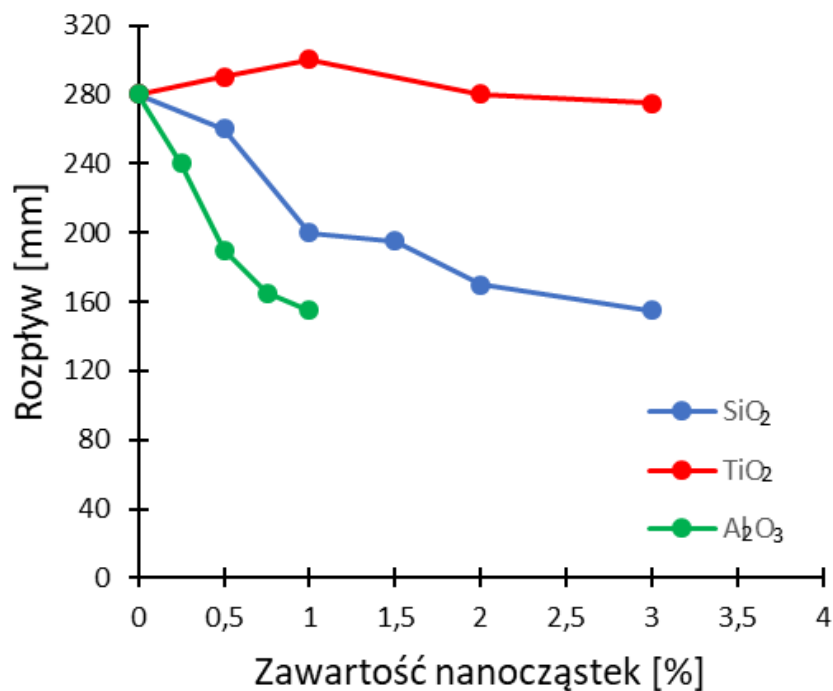
Rys. 28. Wpływ dodatku nanocząstek SiO₂ na wytrzymałość na ściskanie zaprawy warstwy wierzchniej w przypadku dodatku o wymiarze nanocząstki: a) 12nm, b) 20nm, c) 40nm (opracowanie własne na podstawie [57])

Rys. 29 przedstawia z kolei określony w literaturze wpływ dodatku nanocząstek SiO₂, TiO₂ oraz Al₂O₃ na wytrzymałość na ściskanie zapraw wysokiej wytrzymałości [82]. Xu i inni wykazali, że dodatek nanocząstek SiO₂ poprawia wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu zaprawy wysokiej wytrzymałości, dodatek nanocząstek Al₂O₃ nie ma na nią znaczącego wpływu, a dodatek nanocząstek TiO₂ pogarsza ją.



Rys. 29. Wpływ dodatku nanocząstek na wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych wysokiej wytrzymałości: a) SiO₂, b) TiO₂, c) Al₂O₃ (opracowanie własne na podstawie [82])

Xu i inni w swoich badaniach opisali także wpływ tych nanocząstek na konsystencję świeżej zaprawy. Rys. 30 przedstawia wpływ dodatku nanocząstek SiO₂, Al₂O₃ oraz TiO₂ na konsystencję świeżej zaprawy ustaloną metodą stolika rozplwywu. Wykazano, że dodatek nanocząstek SiO₂ oraz Al₂O₃ (krzywa niebieska oraz zielona) powoduje pogorszenie konsystencji świeżej zaprawy wysokiej wytrzymałości, a z kolei dodatek nanocząstek TiO₂ nie ma na nią wpływu (krzywa czerwona).



Rys. 30. Wpływ dodatku nanocząstek SiO₂, Al₂O₃ oraz TiO₂ na konsystencję (rozptyw) świeżej zaprawy cementowej (opracowanie własne na podstawie [82])

3.7. Wnioski z przeglądu literaturowego

W literaturze wykazano dotychczas, że modyfikacja składu zaprawy cementowej warstwy wierzchniej poprzez dodanie do jej składu nanocząstek może zwiększyć przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu. Brakuje jednak szerszych badań dotyczących tego problemu ([135],[53]).

W Tab. 4 pokazano dotychczas badane właściwości cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości z dodatkiem nanocząstek. Rodzaj badanych nanocząstek pokazano w górnej części tabeli, a badane cechy pokazano po lewej stronie.

Tab. 4. Dotychczas badane właściwości cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości z dodatkiem nanocząstek

Badana właściwość	Rodzaj nanocząstki		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂
Właściwości świeżej zaprawy			
Gęstość objętościowa	-	-	-
Czasy wiązania	-	-	-
Konsystencja	+	+	+
Właściwości fizyczne			
Gęstość objętościowa	-	-	-
Porowatość	-	-	-
Właściwości wytrzymałościowe			
Wytrzymałość na ściskanie	+	+	+
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	+	+	+
Właściwości adhezyjne			
Przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu	-	-	-
Właściwości funkcjonalne			
Ścieralność	-	-	-
Przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie	-	-	-
+ właściwość badana w literaturze, - właściwość nie badana do tej pory w literaturze			

Analizując Tab. 4 należy przede wszystkim zwrócić uwagę na brak danych literaturowych świadczących o wynikach badań dotyczących właściwości adhezyjnych (przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu), właściwości funkcjonalnych jak ścieralność oraz przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie zaprawy warstwy wierzchniej. Szczątkowe są również informacje dotyczące wpływu tych nanocząstek na właściwości świeżej zaprawy oraz właściwości fizyczne zapraw warstwy wierzchniej.

Podsumowując, brak jest wyników badań dotyczących wpływu dodatku nanocząstek do zaprawy cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości na jej przyczepność przy odrywaniu od podkładu, a także na jej właściwości funkcjonalne. Dotychczasowe zastosowanie nanocząstek jako dodatku do warstw wierzchnich dotyczy cementowych warstw wierzchnich

zwykłej wytrzymałości. Znany jest wpływ sposobu przygotowania powierzchni podkładu na właściwości adhezyjne warstw wierzchnich i za najbardziej optymalny uznaje się śrutowanie. Zatem brak jest kompleksowych badań dotyczących podstawowych właściwości cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości modyfikowanych nanocząstkami w podłogach

Na tej podstawie podkreślono kierunki badań. Konkretnie wnioski i luki badawcze są wymienione poniżej:

- *Julio i in.* [135] oraz *Ghazy i Bassuoni* [53] zastosowali nanocząstki SiO_2 i Al_2O_3 w celu zwiększenia przyczepności przy ścinaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu. Nadal jednak brakuje szerszych badań w tej kwestii,
- warto podjąć próbę zastosowania nanocząstek w celu zmniejszenia udziału frakcyjnego i liczby porów w strefie zespolenia cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach w celu zwiększenia przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu. Na to, że jest taka szansa wskazują przede wszystkim badania przeprowadzone przez *Sadowskiego i Stefaniuka* ([120],[119]),
- przy prowadzeniu badań przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu należy zbadać również wpływ modyfikacji zaprawy warstwy wierzchniej wybranymi nanocząstkami na jej właściwości wytrzymałościowe i funkcjonalne takie jak wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie, ścieralność, przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie,
- należy przeprowadzić uzupełniające badania strukturalne. Próbkę pobrane ze strefy zespolenia między cementową warstwą wierzchnią a podkładem, wraz z próbką ze strefy przypowierzchniowej warstwy wierzchniej, powinny zostać zbadane w celu zrozumienia i potwierdzenia jaka jest przyczyna wpływu dodatku nanocząstek na przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu oraz właściwości funkcjonalne i mechaniczne warstwy wierzchniej. Metoda skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) może być szczególnie przydatna do tego celu,
- wskazane jest wyselekcjonowanie na drodze badawczej rodzaju i ilości dodatku tych nanocząstek, dla których zauważalna jest poprawa wydajności mechanicznej warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości w podłogach z punktu widzenia ich podstawowych właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych i funkcjonalnych.

4. OPIS BADANEGO MATERIAŁU, ZAKRES I METODYKA BADAŃ WŁASNYCH

4.1. Opis badanego materiału

W celu przeprowadzenia badań został zaprojektowany i wykonany element modelowy odwzorowujący podłogę. Element ten składał się z podkładu betonowego o grubości 125 mm oraz warstwy wierzchniej o grubości 40 mm. Najpierw wykonano podkład, a następnie warstwę wierzchnią i w tej kolejności opisano wykorzystane materiały poniżej.

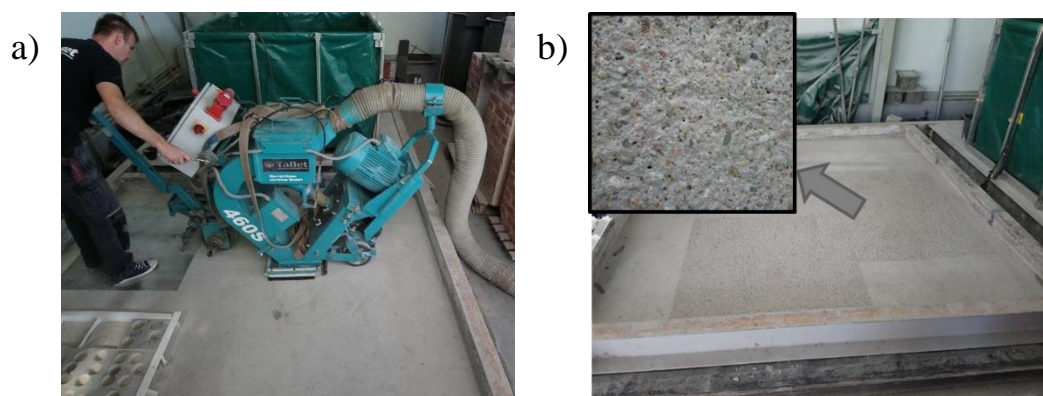
W Tab. 5 przedstawiono skład wagowy mieszanki betonowej użytej do wykonania podkładu. Do wykonania podkładu wykorzystano mieszankę betonową składającą się z 352,0 kg/m³ cementu portlandzkiego CEM II A-LL 42,5 R (Hranice, Czechy), 40 kg/m³ popiołu lotnego (Kogeneracja S.A., Polska), 724,4 kg/m³ piasku kwarcowego kopalnego o uziarnieniu do 2 mm i gęstości objętościowej 2,62 g/cm³ (Kopalnia kruszywa naturalnego WIKA, Paniowice, Polska), 1086,6 kg/m³ kruszywa naturalnego otoczkowego kwarcowego o uziarnieniu do 8 mm i gęstości objętościowej 2,60 g/cm³ (Kopalnia Surowców Mineralnych Byczeń, Byczeń, Polska). Ponadto w celu uzyskania odpowiedniej konsystencji mieszanki betonowej użyto 2,0 l plastyfikatora Sika® ViscoFlow®-6920 na bazie polikarboksylianów o gęstości 1,07 g/cm³ (Sika, Wrocław, Polska).

Tab. 5. Skład wagowy mieszanki betonowej do wykonania podkładu

Składnik mieszanki betonowej	[kg/m ³]
Cement portlandzki CEM II A-LL 42,5 R	352,0
Popiół lotny	40
Woda	165
Piasek kwarcowy kopalny o uziarnieniu do 2mm o gęstości objętościowej 2620 kg/m ³	724,4
Kruszywo naturalne otoczkowe o uziarnieniu do 8 mm o gęstości objętościowej 2600 kg/m ³	1086,6
Superplastyfikator Sika® ViscoFlow®-6920 na bazie polikarboksylianów o gęstości 1070 kg/m ³	2,0

Jak wynika z przedstawionego rozpoznania literaturowego znany jest wpływ sposobu przygotowania powierzchni podkładu na właściwości adhezyjne warstw wierzchnich i za najbardziej optymalny sposób uznaje się śrutowanie. Dlatego powierzchnia podkładu po 28

dniach od zabetonowania została poddana obróbce mechanicznej powierzchni poprzez śrutowanie (Rys. 31).



Rys. 31. Podkład betonowy: a) przygotowanie powierzchni poprzez śrutowanie, b) widok podkładu oraz jego powierzchni po przygotowaniu poprzez śrutowanie

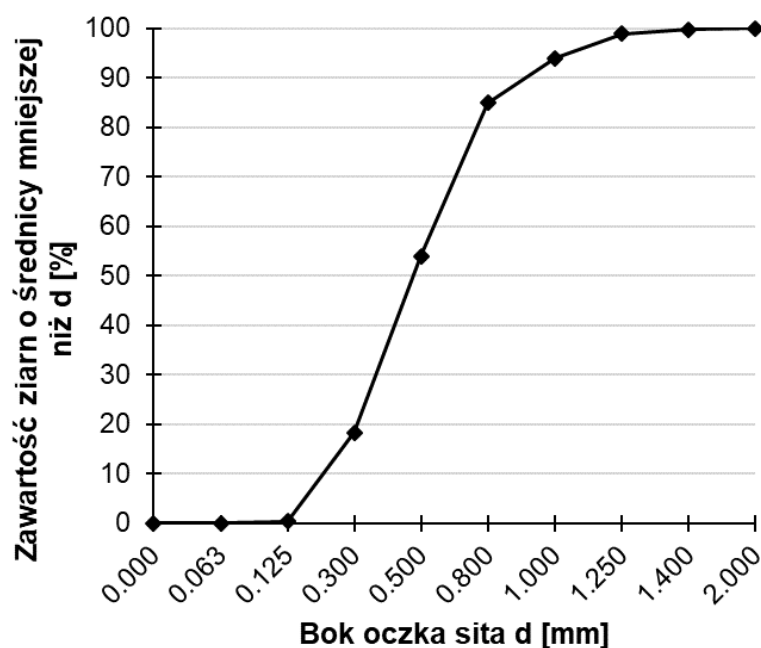
Następnie na tak przygotowane podkłady betonowe została naniesiona warstwa wierzchnia wykonana z zapraw cementowych wysokiej wytrzymałości różniących się procentową zawartością dodatku wybranych nanocząstek (w stosunku do masy cementu). Zaprawę referencyjną zaprojektowano bez dodatku nanocząstek jako cementową warstwę wierzchnią wysokiej wytrzymałości klasy C60, F10 na podstawie [82].

Do wykonania cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości użyto następujących składników: cement portlandzki CEM I 42,5 R (Górażdże Cement S.A. Heidelberg Cement Group, Górażdże, Polska) o gęstości nasypowej 1.106 g/cm^3 , suszony piasek kwarcowy o uziarnieniu do 2 mm (Zakład Przetwórstwa Kruszyw MARGO, Mietków, Polska) o gęstości nasypowej $1,497 \text{ g/cm}^3$, superplastyfikator na bazie polikarboksylanów Sika ViscoCrete 20 HE (Sika, Wrocław, Polska), dozowany w ilości 0,5% masy cementu. Procentowa zawartość nanocząstek w stosunku do masy cementu wynosiła od 0 % w przypadku zaprawy referencyjnej oraz 0,5 %, 1 % oraz 1,5 % w przypadku zapraw z dodatkiem nanocząstek. W Tab. 6 podano składy wszystkich serii zapraw, z których wykonano cementową warstwę wierzchnią wysokiej wytrzymałości.

Tab. 6. Skład zapraw cementowych z dodatkiem nanocząstek z których wykonano cementową warstwę wierzchnią wysokiej wytrzymałości (w przeliczeniu na 100g piasku)

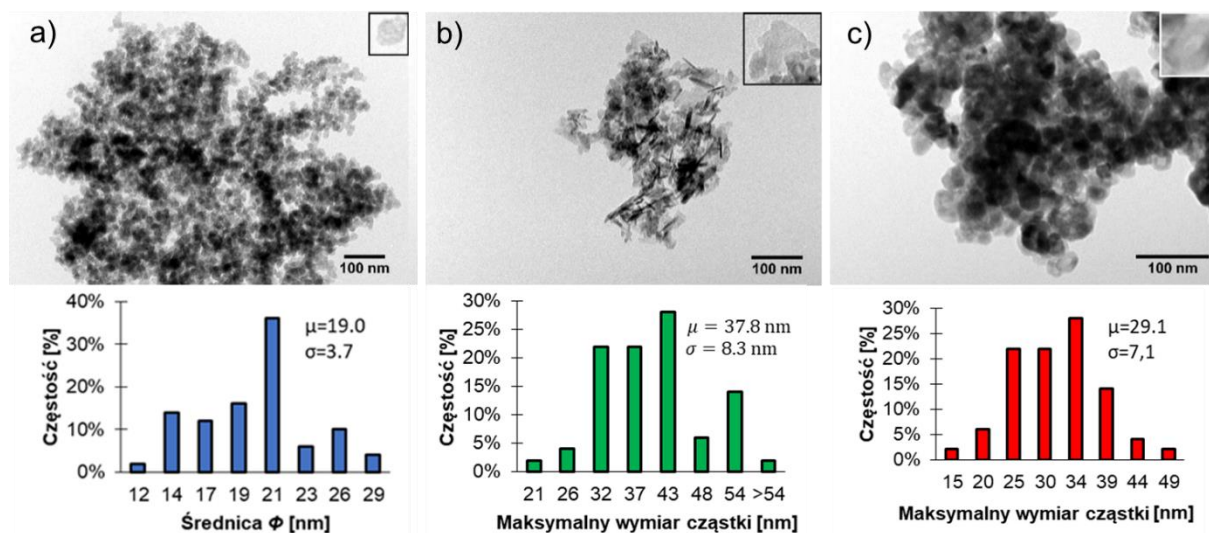
Seria	Zawartość dodatku nanocząstek [%]	Piasek [g]	Cement [g]	Woda [g]	Plastyfikator [g]	Al ₂ O ₃ [g]	SiO ₂ [g]	TiO ₂ [g]
-	[%]	[g]						
R-0	bez dodatku (zaprawa referencyjna)	100	73,3	22	0,37			
Zaprawa z dodatkiem nanosfer amorficznego SiO₂								
S-0,5	0,5%	100	73,3	22	0,37		0,37	
S-1,0	1,0%	100	73,3	22	0,37		0,73	
S-1,5	1,5%	100	73,3	22	0,37		1,10	
Zaprawa z dodatkiem nanoproszku Al₂O₃								
A-0,5	0,5%	100	73,3	22	0,37	0,37		
A-1,0	1,0%	100	73,3	22	0,37	0,73		
A-1,5	1,5%	100	73,3	22	0,37	1,10		
Zaprawa z dodatkiem tetragonalnych krystalicznych nanocząstek TiO₂								
T-0,5	0,5%	100	73,3	22	0,37			0,37
T-1,0	1,0%	100	73,3	22	0,37			0,73
T-1,5	1,5 %	100	73,3	22	0,37			1,10

Z kolei na Rys. 32 przedstawiono krzywą uziarnienia piasku kwarcowego użytego do wykonania warstwy wierzchniej.



Rys. 32. Krzywa uziarnienia piasku płukanego kwarcowego (na podstawie [148])

Jako dodatku do zaprawy warstwy wierzchniej użyto nanocząstek tlenku krzemu (SiO_2) o czystości 95% i średnicy $19 \pm 3,7$ nm (Rys. 33a), oraz nanocząstek tlenku aluminium (Al_2O_3) o czystości 99,8 % oraz wielkości cząstek poniżej 50 nm (Rys. 33b) oraz nanocząstek tlenku tytanu (TiO_2) o czystości 99,7 % oraz wielkości cząstek $29 \pm 7,1$ nm (Rys. 33c).



Rys. 33. Obraz wykonany transmisyjnym mikroskopem elektronowym oraz rozkład wielkości nanocząstek: a) SiO_2 , b) Al_2O_3 , c) TiO_2 (opracowanie własne na podstawie [146])

Rozkłady wielkości badanych nanocząstek uzyskane na podstawie 50 losowo wybranych nanocząstek. Morfologię nanocząstek określono z wykorzystaniem transmisyjnego mikroskopu elektronowego Hitachi H-800 (Hitachi, Tokio, Japonia). W tym celu nanocząstki zostały umieszczone w dejonizowanej wodzie i poddane działaniu fal ultradźwiękowych przez jedną sekundę w celu rozdzielenia ich aglomeratów. Następnie zostały umieszczone na siatce węglowo-miedzianej i osuszone. Obserwacja była prowadzona w standardowym jasnym polu, z napięciem przyspieszającym 150 kV i z użyciem aparatu EMSIS Quemesa CCD. Na podstawie uzyskanych obrazów stworzono rozkłady wielkości nanocząstek na podstawie pomiaru 50 losowo wybranych cząstek (dla każdego rodzaju nanocząstek).

Tab. 7 przedstawia powierzchnie właściwe zastosowanych nanocząstek. Powierzchnia właściwa nanocząstek SiO_2 jest około 5,5-7,5 krotnie większa w porównaniu do nanocząstek Al_2O_3 oraz nanocząstek TiO_2 .

Tab. 7. Powierzchnia właściwa zastosowanych nanocząstek (na podstawie danych producenta)

Rodzaj zastosowanej nanocząstki	Powierzchnia właściwa [m ² /g]
SiO ₂	300
Al ₂ O ₃	>40
TiO ₂	45-55

Z kolei na Rys. 34 pokazano widok nanocząstek wykorzystanych w badaniach. Kolejno od lewej: nanocząstki SiO₂, nanocząstki Al₂O₃ oraz nanocząstki TiO₂.

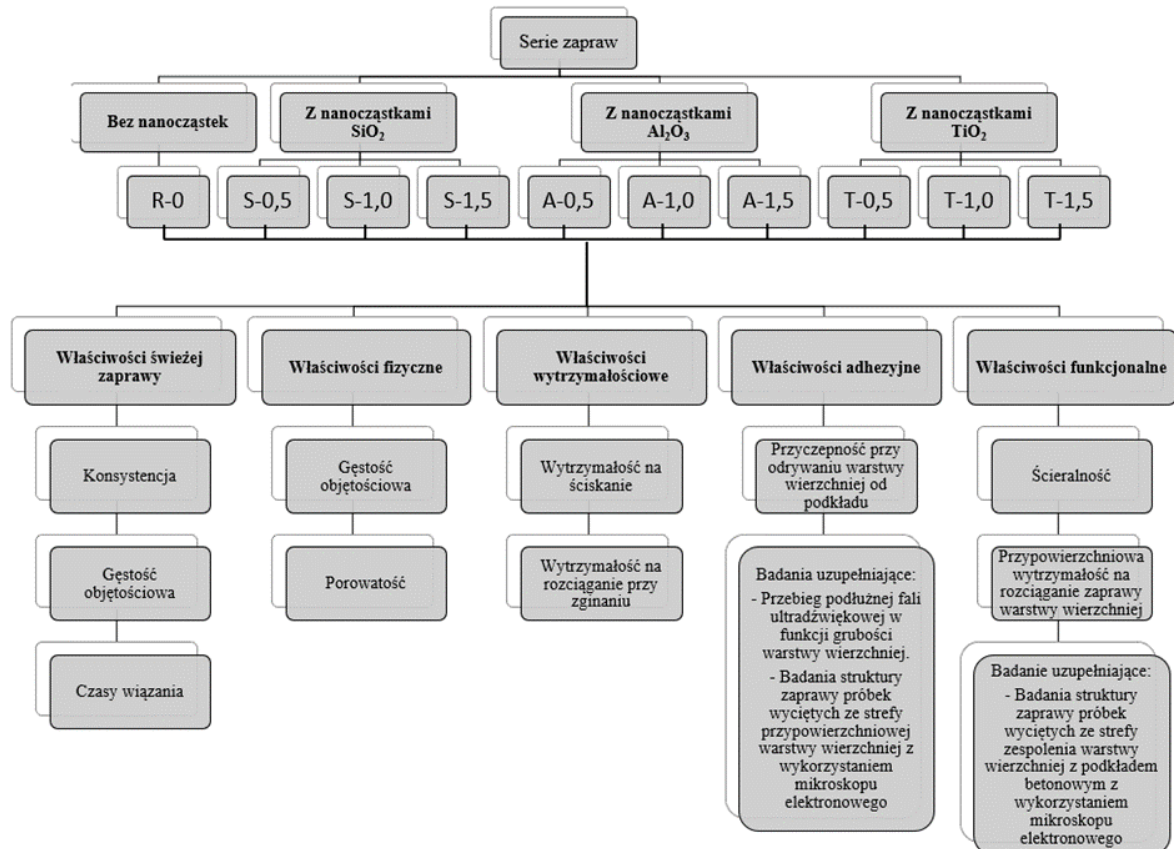


Rys. 34. Widok nanocząstek wykorzystanych w badaniach

Procedura przygotowania świeżej zaprawy cementowej polegała na dodaniu i wymieszaniu nanocząstek wraz z wodą zarobową oraz superplastyfikatorem. Następnie dodawano cement i mieszano całość przez 45 s mieszarką automatyczną z prędkością obrotową 140 obr/min. Potem dodawano piasek i mieszano całość przez kolejne 45 s z prędkością 140 obr/min. Następnie całość mieszano przez 18 s z prędkością 285 obr/min. Beton warstwy podkładowej i zaprawa cementowa warstwy wierzchniej dojrzewały w sposób naturalny, w temperaturze powietrza +20°C (±3°C) i wilgotności względnej powietrza 60% (±5%).

4.2. Zakres badań własnych

Zakres przeprowadzonych badań własnych został przedstawiony na Rys. 35. Obejmował on właściwości świeżej zaprawy, właściwości fizyczne, właściwości wytrzymałościowe, właściwości adhezyjne oraz właściwości funkcjonalne warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach.



Rys. 35. Zakres badań przeprowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej

W sumie podczas badań wykorzystano 260 próbek, których liczbę, wymiary i przeznaczenie zestawienie pokazano w Tab. 8.

Tab. 8 Zestawienie liczby próbek, ich wymiarów oraz przeznaczenia

Wielkość próbki [mm]	Liczba próbek [szt]	Przeznaczenie
40x40x160	30	Badania właściwości fizyczne stwardniałych zapraw
40x40x160	60	Badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu
40x40x160	60	Badania wytrzymałości na ściskanie
$\Phi=50$	30	Badania przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu
$\Phi=50$	30	Badania przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie warstwy wierzchniej
71x71x40	30	Badania ścieralności
11x11x11	10	Badania uzupełniające SEM na próbkach wyciętych ze strefy zespolenia
11x11x11	10	Badania uzupełniające SEM na próbkach wyciętych ze strefy przypowierzchniowej warstwy wierzchniej

4.3. Metodyka badań właściwości świeżej zaprawy

4.3.1. Konsystencja

Konsystencje świeżej zaprawy cementowej ustalono za pomocą stożka Novikowa zgodnie z normą PN-B-04500 [1]. Świeżą zaprawę cementową ułożono w stożkowym naczyniu pomiarowym. Następnie prostopadle do powierzchni zaprawy został przyłożony stożek Novikowa (MERAZET S. A., Poznań, Polska) tak by jego wierzchołek stykał się z powierzchnią zaprawy. Wtedy upuszczono stożek tak by opadał swobodnie przez 10 s. Po tym czasie opad stożka został odczytany ze skali naniesionej na powierzchni bocznej stożka. Badanie to zostało przeprowadzone trzy razy dla każdej serii zaprawy. Rys. 36 przedstawia widok stanowiska badawczego do badania opadu stożka Novikowa.



Rys. 36. Widok stanowiska badawczego do badania konsystencji zaprawy metodą opadu stożka Novikowa

4.3.2. Gęstość objętościowa

Przed wykonaniem warstwy wierzchniej ustalono gęstość objętościową świeżej zaprawy cementowej zgodnie z normą PN-EN 1015-6 [103]. Świeżą zaprawę umieszczono w cylindrycznej formie o określonej objętości, zagęszczono oraz zważono. Następnie obliczono gęstość objętościową. Badanie to zostało wykonane trzy razy dla każdej serii zaprawy.

Rys. 37 przedstawia widok stanowiska badawczego do badania gęstości objętościowej świeżej zaprawy cementowej.



Rys. 37 Widok stanowiska badawczego do badania gęstości objętościowej świeżej zaprawy cementowej

4.3.3. Czasy wiązania

Czas początku wiązania oraz czas końca wiązania zapraw cementowych zostały określone aparatem Vicata zgodnie z normą PN-EN 196-1 (196-3) [38]. Rys. 38 przedstawia widok stanowisk badawczych do badania czasów wiązania aparatem Vicata.



Rys. 38 Widok stanowisk badawczych do badania czasów wiązania aparatem Vicata

4.4. Metodyka badań właściwości fizycznych

4.4.1. Gęstość objętościowa

Zgodnie z normą EN 13892-2 [34] 6 próbek o wymiarach 40 x 40 x 160 mm zostało przygotowanych w celu określenia właściwości wytrzymałościowych oraz porowatości stwardniałych zapraw cementowych. Do czasu badania próbki były przechowywane w temperaturze 21 ± 1 °C i wilgotności powietrza do 90%. Badania zostały przeprowadzone po 28 dniach od momentu przygotowania próbek. Jako pierwsze zostały przeprowadzone badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu na 6 próbkach o wymiarach 40 x 40 x 160 mm. Następnie 12 połówek próbek powstałych po tym badaniu zostało przeznaczonych do badania wytrzymałości na ściskanie (6 połówek) oraz właściwości fizycznych tj. całkowitej porowatości oraz gęstości objętościowej (6 połówek). W celu określenia gęstości objętościowej metodą opisaną w normie PN-85/B-04500.

4.4.2. Porowatość

W celu określenia porowatości wykorzystano metodę opisaną w normie PN-85/B-04500. Całkowita porowatość p została ustalona z wykorzystaniem naczynia Le Chatelier'a zgodnie z równaniem:

$$p = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \cdot 100 \quad (4)$$

gdzie:

ρ gęstość (kg/cm^3),

ρ_0 gęstość objętościowa (kg/cm^3).

4.5. Metodyka badań właściwości wytrzymałościowych

4.5.1. Wytrzymałość na ściskanie

W celu określenia wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej wysokiej wytrzymałości wykorzystano metodę opisaną w normie PN-EN 196-1: 2016. Badanie wykonano po 28 dniach od momentu przygotowania próbek. Przebadano po 6 próbek dla każdej serii zaprawy. Rys. 39 przedstawia widok stanowiska do badania wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej wysokiej wytrzymałości (Rys. 39a).



Rys. 39 Widok stanowiska do badania wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej wysokiej wytrzymałości

4.5.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

W celu określenia wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zaprawy cementowej wysokiej wytrzymałości wykorzystano metodę opisaną w normie PN-EN 196-1: 2016. Badanie wykonano po 28 dniach od momentu przygotowania próbek. Przebadano po 6 próbek o wymiarach 4x4x16 cm dla każdej serii zaprawy. Rys. 40 przedstawia widok stanowiska do badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zaprawy cementowej wysokiej wytrzymałości.

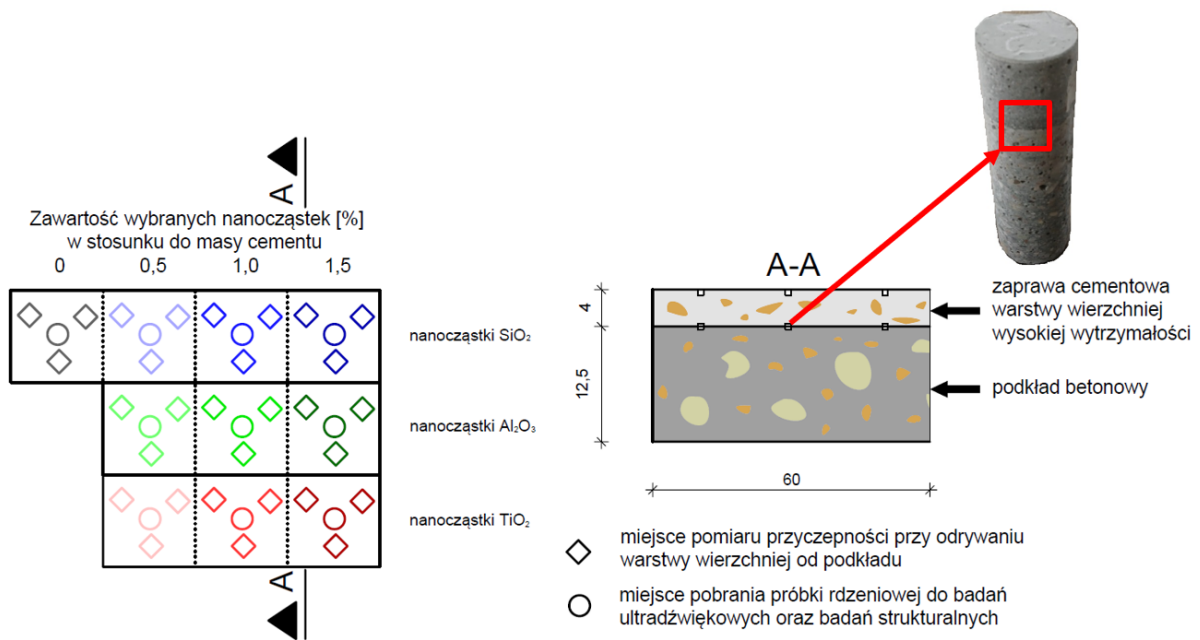


Rys. 40. Widok stanowiska do badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zaprawy cementowej wysokiej wytrzymałości

4.6. Metodyka badań właściwości adhezyjnych

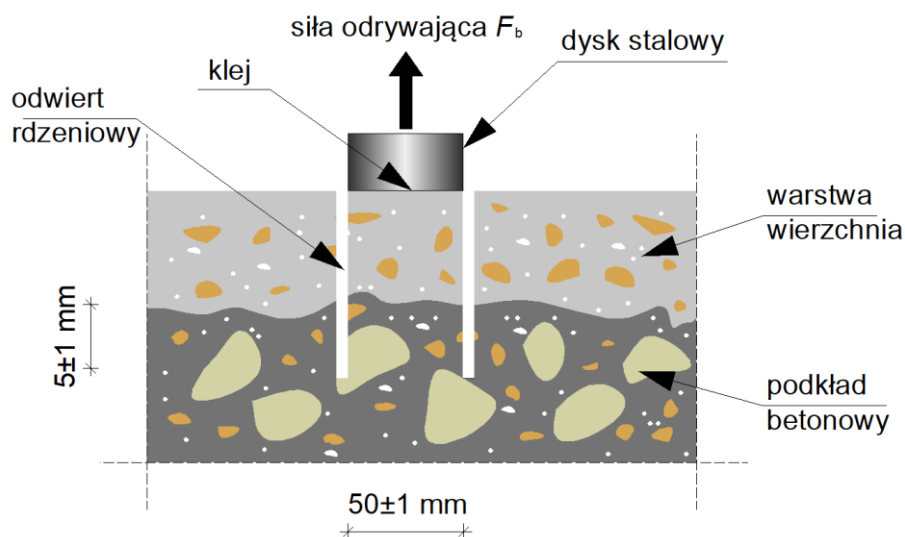
4.6.1. Przyczepność przy odrywaniu warstwy cementowej wierzchniej wysokiej wytrzymałości od podkładu

Po 28 dniach od ułożenia warstwy wierzchniej z zapraw cementowych wysokiej wytrzymałości na podkładzie betonowym zbadano przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu zgodnie z normą EN 1542 [37]. Rys. 41 przedstawia schemat elementu modelowego zaprojektowanego do badania przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości od podkładu. Z lewej strony rysunku pokazano widok elementu modelowego wraz z zaznaczeniem miejsc pomiaru przyczepności oraz miejscem z którego pobrano odwierty rdzeniowe w celu przeprowadzenia dodatkowych badań strukturalnych zaprawy warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w strefie zespolenia. W górnej części rzutu pokazano zawartość badanych nanocząstek w stosunku do masy cementu, a po prawej stronie rzutu rodzaj zastosowanej nanocząstki. Z kolei po prawej stronie rysunku pokazano przekrój przez element modelowy wraz z zaznaczeniem miejsca z którego pobrano próbkę do badań strukturalnych z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego oraz widok całego odwiertu.



Rys. 41. Schemat elementu modelowego zaprojektowanego do badania właściwości adhezyjnych cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości

Najpierw wykonano odwiert rdzeniowe o średnicy 50 mm i głębokości około 5 mm poniżej strefy zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem przy użyciu wiertła koronkowego. Następnie w miejscach odwiertów przyklejono stalowe dyski o średnicy 50 mm. Po utwardzeniu kleju rozpoczęto odrywanie stalowych dysków przy pomocy siłownika automatycznego Proceq DY 216 (Proceq AG, Schwerzenbach, Szwajcaria) ze stałym przyrostem naprężeń równym 0,05 MPa/s. W przypadku każdej serii zaprawy badanie przeprowadzono w co najmniej trzech miejscach. Na Rys. 42 pokazano schemat metody badania właściwości adhezyjnych cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości.



Rys. 42 Schemat metody badania przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości (na podstawie [149])

Następnie wyznaczono przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu według zależności:

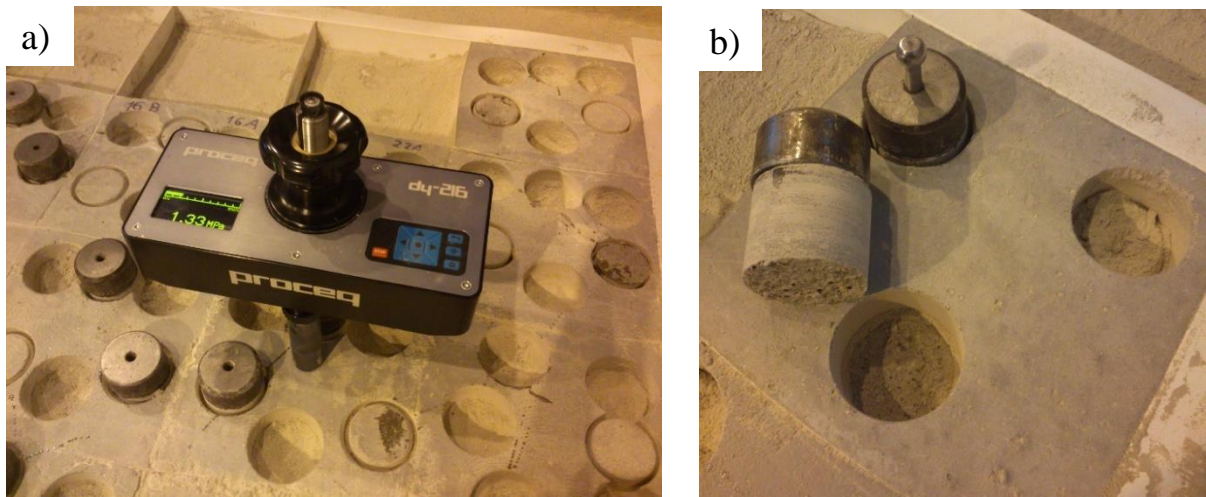
$$f_b = \frac{4F_b}{\pi D_f^2} \quad (5)$$

gdzie:

F_b siła odrywająca (N),

D_f średnica odwiertu rdzeniowego (m).

Na Rys. 43 przedstawiono widok stanowiska badawczego do badania przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu w trakcie badania (Rys. 43a) oraz po wykonaniu badania (Rys. 43b).



Rys. 43 Widok stanowiska badawczego do badania przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości: a) w trakcie badania, b) po wykonaniu badania

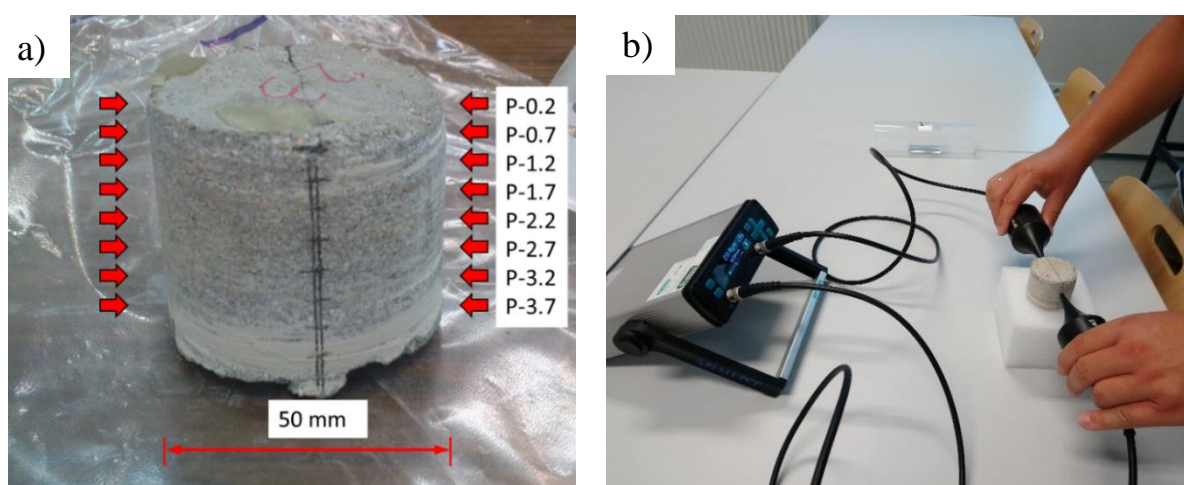
Na Rys. 44 pokazano widok elementu modelowego podczas badania przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu.



Rys. 44. Widok powierzchni cementowej warstwy wierzchniej podczas badania przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu

4.6.2. Badania uzupełniające przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej w funkcji grubości warstwy wierzchniej

Dla każdej serii zaprawy jedna próbka rdzeniowa o średnicy 50 mm została pobrana w celu ustalenia przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej c_L w funkcji grubości warstwy wierzchniej H . Punkty pomiarowe zostały zaznaczone na powierzchniach bocznych próbek w odstępach 5 mm (Rys. 45a). Do badań użyto głowic ultradźwiękowych (Proceq AG, Schwerzenbach, Szwajcaria) o kontakcie punktowym i częstotliwości 40 kHz. Na Rys. 45a okazano widok próbki rdzeniowej pobranej z warstwy wierzchniej z zaprawy cementowej wraz z naniesionymi punktami pomiarowymi, a na Rys. 45b pokazano próbkę podczas badania.



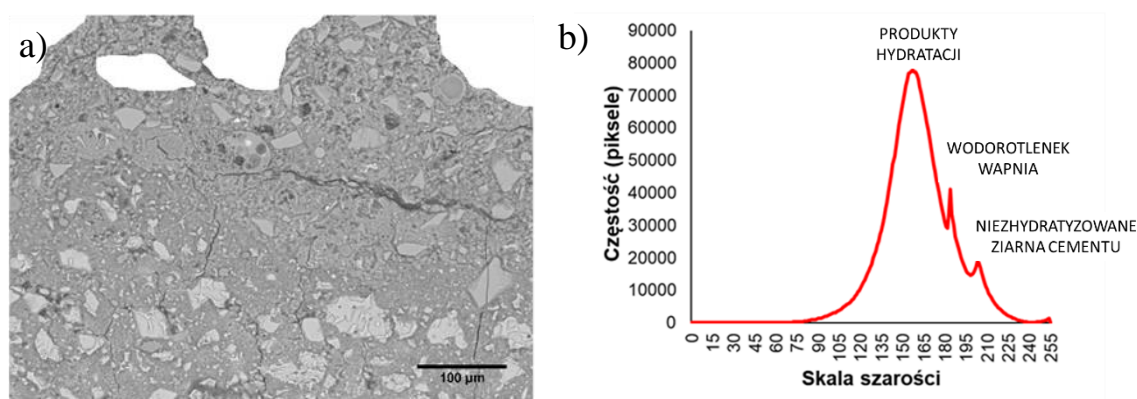
Rys. 45 Metoda ultradźwiękowa: a) widok próbki rdzeniowej pobranej z warstwy wierzchniej z zaprawy cementowej wraz z naniesionymi punktami pomiarowymi, b) próbka rdzeniowa podczas badania [149]

4.6.3. Badania uzupełniające struktury zaprawy w strefie zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego

Próbki do badań skaningowym mikroskopem elektronowym uzyskano poprzez odwiert rdzeniowy o średnicy 50 mm w elemencie modelowym podłogi, a następnie przez wycięcie z niego kostek sześciennych o boku 11 mm za pomocą piły diamentowej. Próbki zostały wycięte ze strefy zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem. Do badań wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy JEOL JSM-6610A z katodą wolframową. Napięcie przyspieszające wynosiło 20 kV, prąd wiązki 40 nA, a odległość roboczą 10 mm.

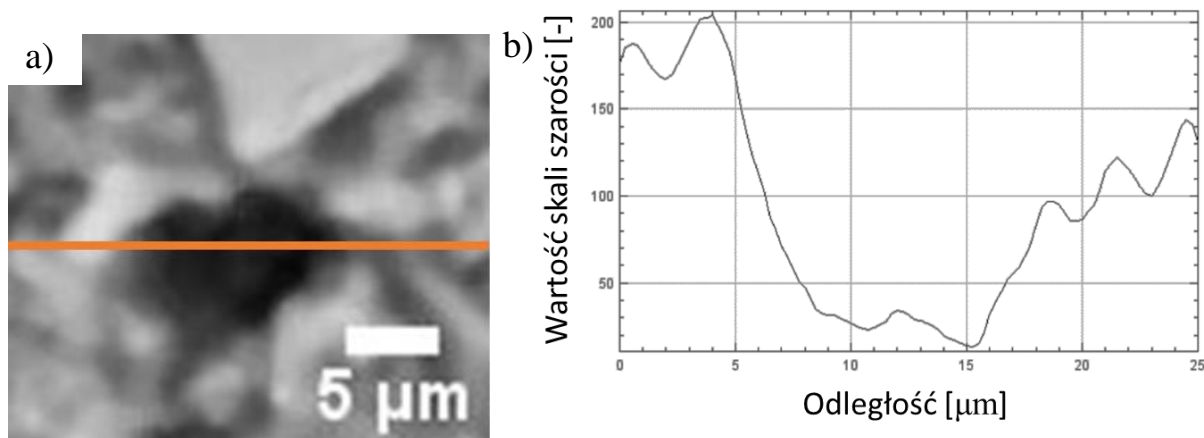
Skorzystano z metody analizy obrazów uzyskanych z SEM przedstawionej między innymi w pracy [154]. Metoda ta wykorzystuje różnice w jasności pikseli odpowiadających poszczególnym fazom zaprawy. Na Rys. 46a zostało pokazany przykładowy obraz BSE

zaprawy. Na rysunku wycięto kruszywo, aby analizować tylko matrycę cementową. Na Rys. 46b został przedstawiony histogram skali szarości obrazu z Rys. 46a. Widać na nim piki odpowiadające produktom hydratacji HP, wodorotlenkowi wapnia CH oraz niezhydratyzowanym ziarnom cementu. W przypadku zapraw o większym stosunku W/C po lewej stronie histogramu byłby również widoczny pik odpowiadający porom.



Rys. 46 Przykładowy: a) obraz fragmentu stwardniałej zaprawy cementowej uzyskany pod wpływem wiązki elektronów wstecznie rozproszonych (BSE), b) histogram skali szarości uzyskany w efekcie analizy obrazu BSE fragmentu stwardniałej zaprawy cementowej (opracowanie własne na podstawie [150])

Rys. 47a przedstawia obraz BSE pojedynczego pora, z kolei Rys. 47b przedstawia wykres zmian wartości na skali szarości wzdłuż pomarańczowej linii przecinającej obraz pora. Na Rys. 47b widoczne są spadki wartości na skali szarości w odległości od 5 do 10 µm oraz od 18 do 15 µm. Ten stopniowy spadek sprawia, że określenie granicy pora jest niedokładne, gdyż różnice w wielkości pora w zależności w którym miejscu przyjmujemy jego granicę byłyby znaczne. Jednak granica pora znajduje się bliżej strefy o wyższej wartości skali szarości i jest to związane z przejściem wiązki elektronów przez granicę materiałów różniących się liczbą atomową.



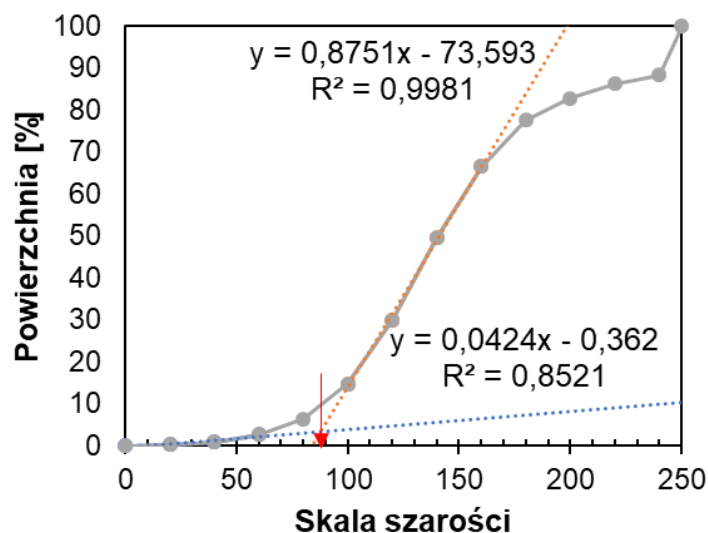
Rys. 47. Przykładowy: a) obraz BSE pojedynczego pora, b) wykres zmian wartości na skali szarości wzdłuż pomarańczowej linii

Rys. 48 przedstawia zmiany obszaru zaznaczonego (kolor czerwony) na obrazie BSE pojedynczego pora w zależności od wartości progu szarości. Wraz ze zwiększaniem progu zaznaczany jest coraz większy obszar obszaru pora, aż do momentu gdy bardzo szybko rośnie obszar zaznaczony na całym obrazie (powyżej wartości 100). Punkt krytyczny dla którego po przekroczeniu którego pole zaznaczonego obszaru zaczyna nagle wzrastać stanowi wystarczające przybliżenie wartość progu skali szarości odpowiadającej granicy porów.



Rys. 48 Zmiany obszaru zaznaczonego na obrazie BSE pojedynczego pora w zależności od wartości progu szarości

Rys. 49 przedstawia wykres pokazujący zmiany zaznaczonego obszaru w zależności od wartości progu szarości. Punkt krytyczny może być określony w miejscu przecięcia dwóch linii przerywanych na wykresie. Wartość progu szarości dla tego punktu oznaczono czerwoną strzałką. Wartość ta może być nieznacznie wyższa niż rzeczywista wartość progu. Wartość rzeczywista może zostać przybliżona przez pomnożenie wartości otrzymanej na przecięciu krzywych przez współczynnik np. 0,9.



Rys. 49 Wykres pokazujący zmiany zaznaczonego obszaru w zależności od wartości progowej szarości

Mając powyższe na uwadze, wykorzystując procedurę zaproponowaną w [154], dokonano binaryzacji obrazów dla zadanej wartości progowej (*ang. threshold value*), dzięki czemu możliwe było wyznaczenie udziału frakcyjnego porów ϕ o średnicy od 0,83 do 25 μm próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej definiowanego jako:

$$\Phi = \frac{A_V}{A_T} \quad (6)$$

gdzie:

A_V – powierzchnia porów,

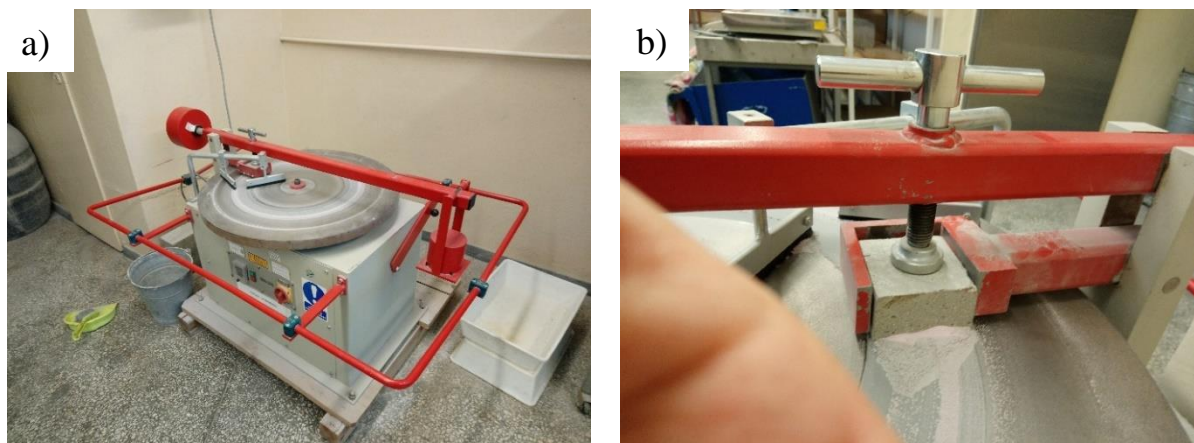
A_T – powierzchnia obrazu bez kruszywa

4.7. Metodyka badań właściwości funkcjonalnych

4.7.1. Ścieralność

W przypadku każdej serii zaprawy wykonano 3 próbki o wymiarach 71 x 71 x 71 mm w celu określenia ścieralności cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości na tarczy Boehme'go zgodnie z normą EN 13892[35]. Przed rozpoczęciem badania próbki zostały wysuszone i umieszczone w ekssykatorach. Przed każdym cyklem ścierania na tarczy Boehme'go (FORM+TEST Seidner&Co., Riedlingen, Niemcy) tarcza została oczyszczona i na pas ścierający został równomiernie rozsypany materiał ścierny (Korund) w ilości 22 g. Następnie próbka została zamocowana w uchwycie i obciążona siłą 294 ± 3 N i poddana 16

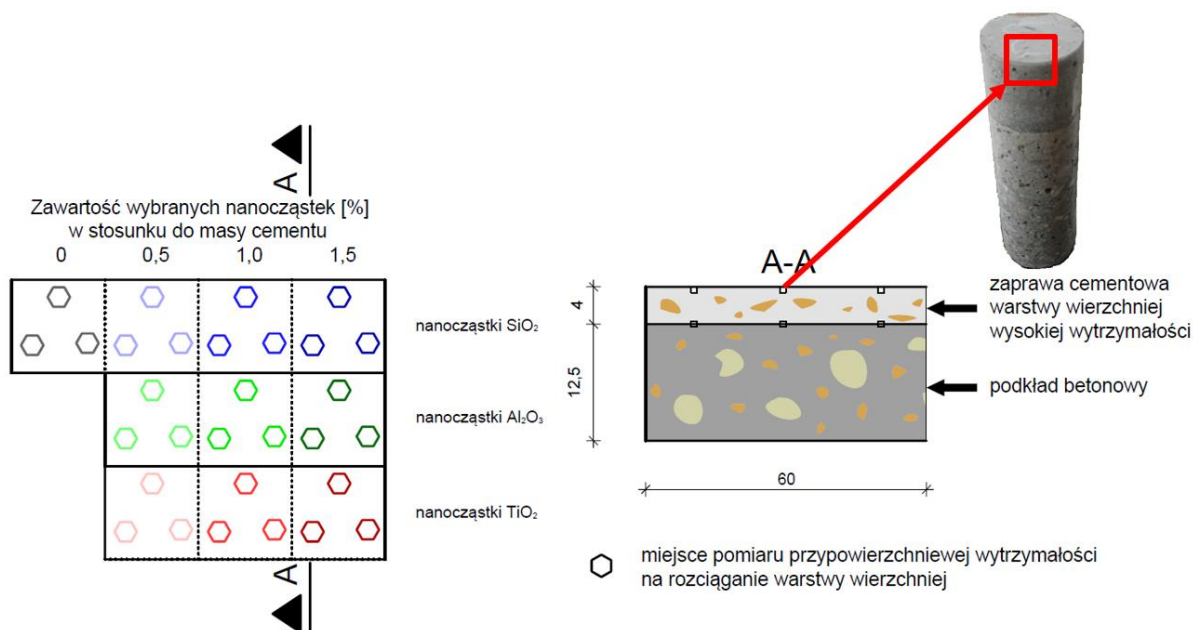
cyklom ścierania. Każdy cykl ścierania składał się z 22 obrotów tarczy, a po każdym 4 cyklach próbka została zważona oraz obrócona o 90° w stosunku do swojej poprzedniej pozycji w uchwycie. Ścieralność została określona jako ubytek masy oraz objętości próbki po 16 cyklach ścierania. Widok stanowiska badawczego oraz widok próbki w zamocowanej w uchwycie w trakcie badania przedstawiono na Rys. 50. Schemat stanowiska badawczego (tarczy Boehmeg'o) został przedstawiony wcześniej na Rys. 8a.



Rys. 50 Stanowisko badawcze do badania ścieralności cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości: a) tarcza Boehme'go, b) próbka zamocowana w uchwycie

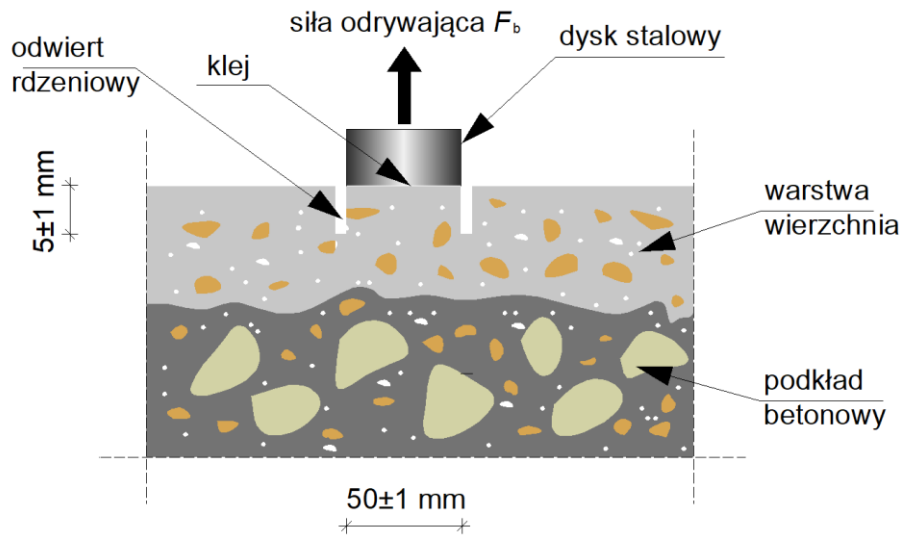
4.7.2. Przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie zaprawy warstwy wierzchniej

Po 28 dniach od ułożenia cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości na podkładzie betonowym przeprowadzono badanie przypowierzchniowej wytrzymałości na odrywanie zaprawy cementowej warstwy wierzchniej zgodnie z EN 1542 [37]. Rys. 51 przedstawia schemat elementu modelowego zaprojektowanego do badania przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości. Z lewej strony rysunku pokazano widok elementu modelowego wraz z zaznaczeniem miejsc pomiaru przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości. W górnej części rzutu pokazano zawartość badanych nanocząstek w stosunku do masy cementu, a po prawej stronie rzutu rodzaj zastosowanej nanocząstki. Z kolei po prawej stronie rysunku pokazano przekrój przez element modelowy wraz z zaznaczeniem miejsca (w strefie przypowierzchniowej) z którego pobrano próbkę do badań strukturalnych z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego oraz widok całego odwiertu rdzeniowego.



Rys. 51. Schemat elementu modelowego zaprojektowanego do badania przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości

W warstwie wierzchniej wykonano odwierty o średnicy 50 mm i głębokości około 5 mm w warstwie wierzchniej przy pomocy wiertła koronowego. Następnie w miejscach tych odwiertów przyklejono stalowe krążki o średnicy 50 mm. Po utwardzeniu kleju oderwano krążki przy pomocy siłownika automatycznego Proceq DY 216 (Proceq AG, Schwerzenbach, Szwajcaria) ze stałym przyrostem naprężeń równym 0,05 MPa/s. Dla każdej serii zapraw przeprowadzono badanie co najmniej w trzech miejscach. Rys. 52 przedstawia schemat metody badania przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie f_h zaprawy warstwy wierzchniej metodą odrywania.



Rys. 52 Schemat metody badania przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie f_h zaprawy warstwy wierzchniej metodą pull-off

Następnie określono przypowierzchniową wytrzymałość na rozciąganie f_h zaprawy warstwy wierzchniej z zależności:

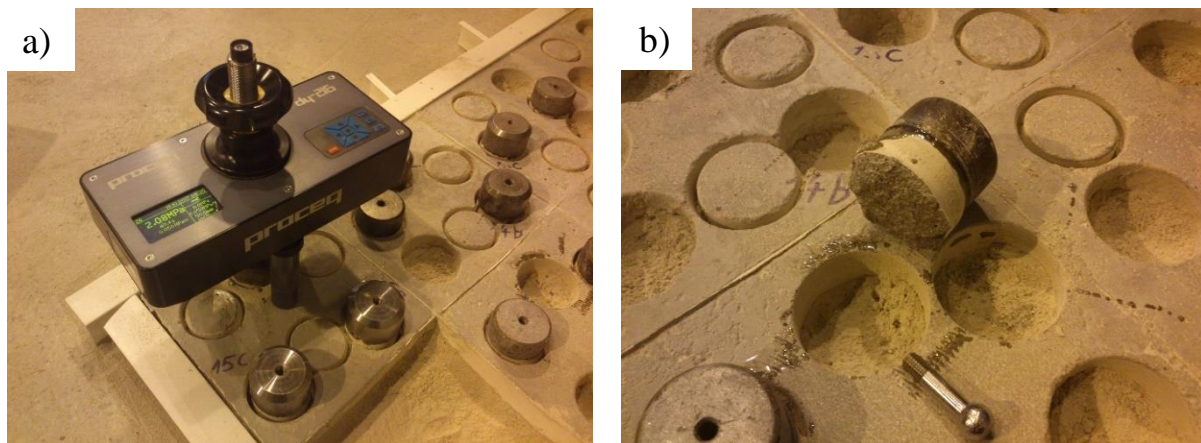
$$f_h = \frac{4F_b}{\pi D_f^2} \quad (6)$$

gdzie:

F_b siła odrywająca (N)

D_f średnica odwiertu rdzeniowego (m)

Na Rys. 53a przedstawiono widok stanowiska badawczego do badania przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie f_h zaprawy warstwy wierzchniej metodą pull-off w trakcie badania, a na Rys. 53b po przeprowadzonym badaniu.



Rys. 53 Widok stanowiska badawczego do badania przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie f_h zaprawy warstwy wierzchniej metodą pull-off: a) w trakcie badania, b) po wykonaniu badania

4.7.3. Badania uzupełniające struktury zaprawy w strefie przypowierzchniowej warstwy wierzchniej z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego

Próbki do badań skaningowym mikroskopem elektronowym uzyskano poprzez odwiert rdzeniowy o średnicy 50 mm w elemencie modelowym podłogi, a następnie przez wycięcie z niego kostek sześciennych o boku 11 mm za pomocą piły diamentowej. Próbki zostały wycięte ze strefy przypowierzchniowej warstwy wierzchniej. Do badań wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy JEOL JSM-6610A z katodą wolframową. Napięcie przyspieszające wynosiło 20 kV, prąd wiązki 40 nA, a odległość roboczą 10 mm. Do analizy obrazów wykorzystano metodologię przedstawioną w [154], omówioną w punkcie 4.6.

4.8. Statystyczna analiza wyników badań

W celu sprawdzenia czy liczba próbek wykorzystanych w badaniach jest wystarczająca posłużono się rozkładem t-Studenta [79]. Skorzystano z zależności 7 przy założeniu poziomu istotności $\alpha=0,1$ oraz maksymalnym założonym błędzie (tolerancji wartości średniej) $\vartheta=0,1$.

$$\frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n}} \leq \frac{\vartheta}{v} \quad (7)$$

gdzie:

t_{α} - kwantyl rozkładu rzędu α o k stopniach swobody,

n – liczba próbek,

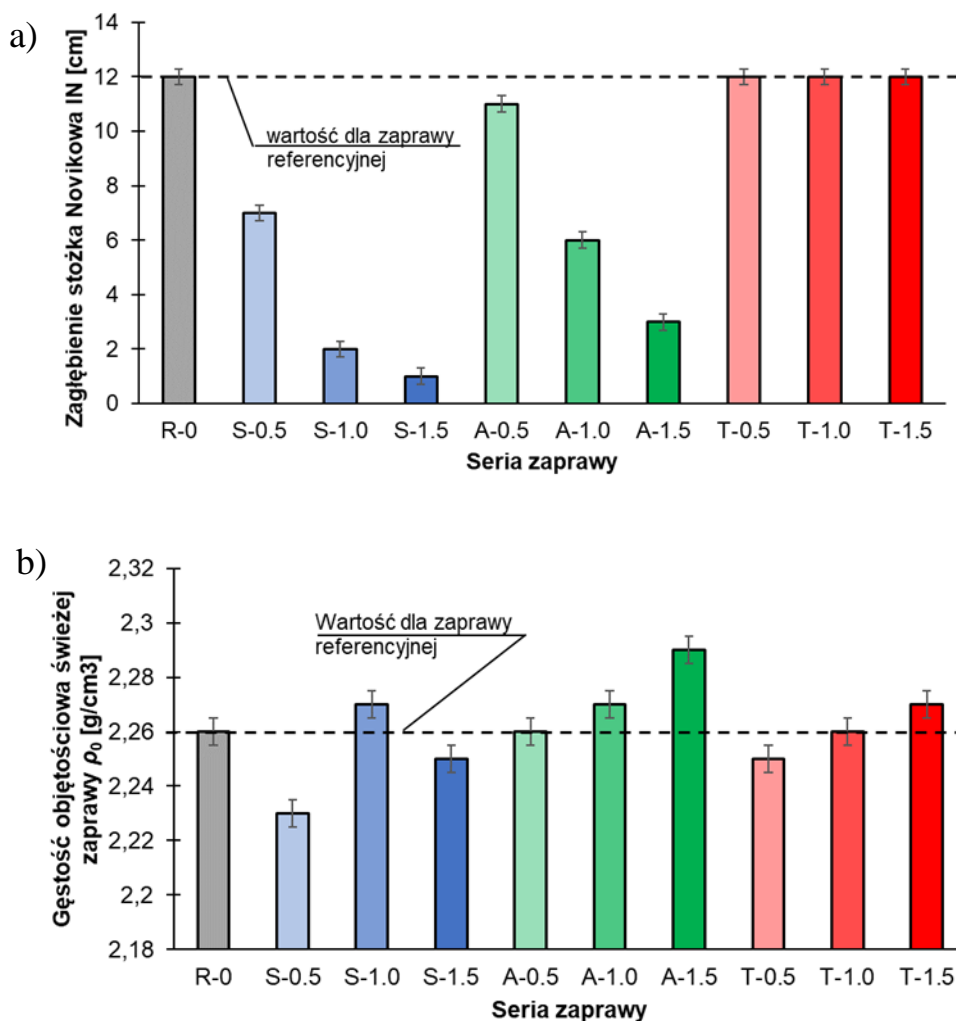
ϑ – założona tolerancja wartości średniej,

v – współczynnik zmienności.

5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

5.1. Właściwości świeżej zaprawy

Rys. 54 przedstawia wyniki badań właściwości świeżej zaprawy cementowej takich jak konsystencja (Rys. 54a) oraz gęstość objętościowa (Rys. 54b).



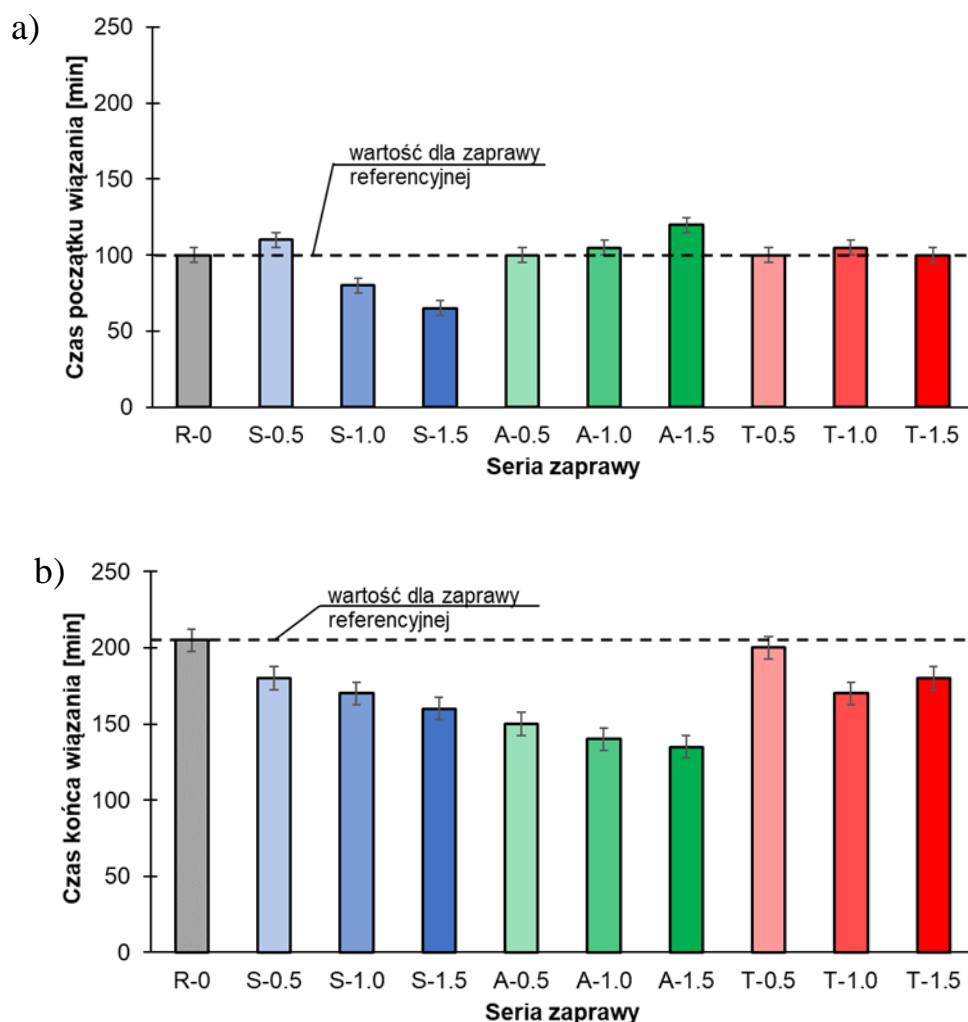
Rys. 54. Wyniki badań właściwości świeżych zapraw cementowych modyfikowanych dodatkiem nanocząstek: a) konsystencja, b) gęstość objętościowa

Z Rys. 54a wynika, że wraz ze wzrostem zawartości nanocząstek SiO₂ oraz nanocząstek Al₂O₃ w stosunku do masy cementu pogarsza się konsystencja świeżej zaprawy cementowej. Wyjątek stanowi dodatek nanocząstek Al₂O₃ w ilości 0.5% w stosunku do masy cementu, dla którego konsystencja świeżej zaprawy cementowej jest na nieznacznie niższym poziomie w porównaniu do zaprawy niezawierającej w swoim składzie nanocząstek Al₂O₃. Z Rys. 54a

wynika również, że wraz ze wzrostem zawartości nanocząstek TiO_2 w stosunku do masy cementu konsystencja ta nie zmienia się.

Z Rys. 54b wynika, że gęstość objętościowa świeżej zaprawy nie zależy od dodatku różnej zawartości nanocząstek SiO_2 i nanocząstek TiO_2 i użytych do wykonania mieszanki. W przypadku nanocząstek Al_2O_3 stwierdzono, że wraz ze wzrostem jego zawartości w stosunku do masy cementu wzrasta gęstość objętościowa świeżej zaprawy, poza dodatkiem w ilości 0,5%, dla którego gęstość objętościowa świeżej zaprawy jest na tym samym poziomie w porównaniu do zaprawy niezawierającej w swoim składzie nanocząstek.

Rys. 55 przedstawia wyniki badań początku czasu wiązania (Rys. 55a) oraz końca czasu wiązania (Rys. 55b).



Rys. 55. Wyniki badań właściwości zapraw modyfikowanych dodatkiem nanocząstek:

a) czas początku wiązania, b) czas końca wiązania

Z Rys. 55a oraz Rys. 55b wynika, że wzrost zawartości nanocząstek SiO₂ powoduje skrócenie czasu początku (poza dodatkiem w ilości 0,5%) i czasu końca wiązania. Z kolei wzrost zawartości nanocząstek TiO₂ nie ma wpływu na początek czasu wiązania zaprawy, ale powoduje skrócenie czasu końca jej wiązania. Ponadto wzrost zawartości nanocząstek Al₂O₃ w porównaniu do zaprawy niezawierającej w swoim składzie nanocząstek Al₂O₃ powoduje skrócenie czasu początku wiązania i wydłużenie czasu końca wiązania.

5.2. Właściwości fizyczne

W Tab. 9 przedstawiono zestawienie wyników badań podstawowych właściwości fizycznych zapraw cementowych, takich jak gęstość objętościowa ρ_0 , oraz porowatość całkowita p .

Tab. 9. Podstawowe właściwości fizyczne badanych zapraw

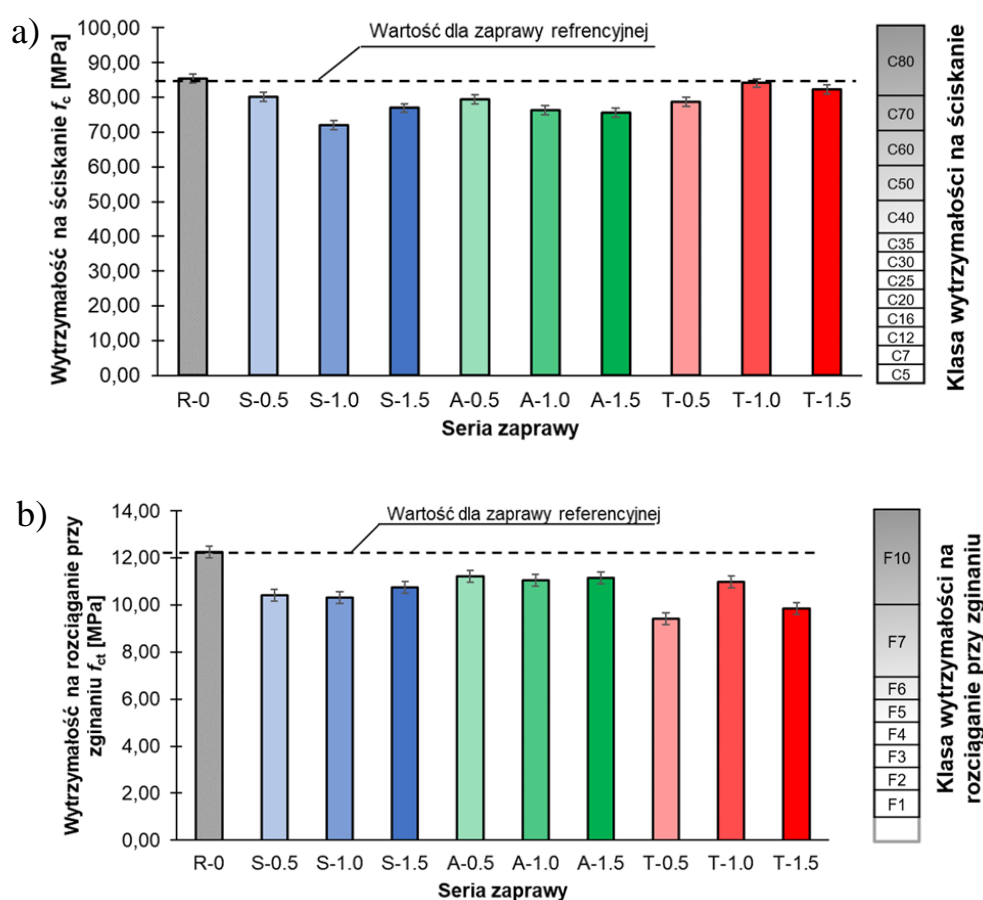
Seria zaprawy	Gęstość objętościowa ρ_0	Porowatość p
	[g/cm ³]	[%]
Zaprawa bez dodatku nanocząstek		
R-0	2,15	15,55
Zaprawa z dodatkiem nanocząstek SiO ₂		
S-0.5	2,13	15,32
S-1.0	2,12	15,51
S-1.5	2,12	15,50
Zaprawa z dodatkiem nanocząstek Al ₂ O ₃		
A-0.5	2,15	14,36
A-1.0	2,13	15,25
A-1.5	2,12	15,34
Zaprawa z dodatkiem nanocząstek TiO ₂		
T-0.5	2,15	13,84
T-1.0	2,16	13,62
T-1.5	2,14	14,26

Z Tab. 9 wynika, że dodatek nanocząstek SiO₂ (niezależnie od ilości) oraz dodatek nanocząstek Al₂O₃ w nieznacznym stopniu wpływają na właściwości fizyczne i mechaniczne

stwardniałej zaprawy. Należy jednak zauważyć, że dodatek nanocząstek Al_2O_3 w ilości 0,5 % zmniejsza porowatość całkowitą w stosunku do zaprawy referencyjnej. Z kolei dodatek nanocząstek Ti_2O_2 zmniejsza porowatość całkowitą zaprawy maksymalnie o około 12,5 % w stosunku do zaprawy referencyjnej.

5.3. Właściwości wytrzymałościowe

Rys. 56 przedstawia analizę porównawczą wyników badań podstawowych właściwości mechanicznych zapraw cementowych takich jak wytrzymałość na ściskanie f_c (Rys. 56a) oraz wytrzymałość na zginanie f_{ct} (Rys. 56b).



Rys. 56. Wyniki badań podstawowych właściwości mechanicznych zapraw cementowych modyfikowanych dodatkiem nanocząstek: a) wytrzymałość na ściskanie f_{cm} , b) wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_{ct}

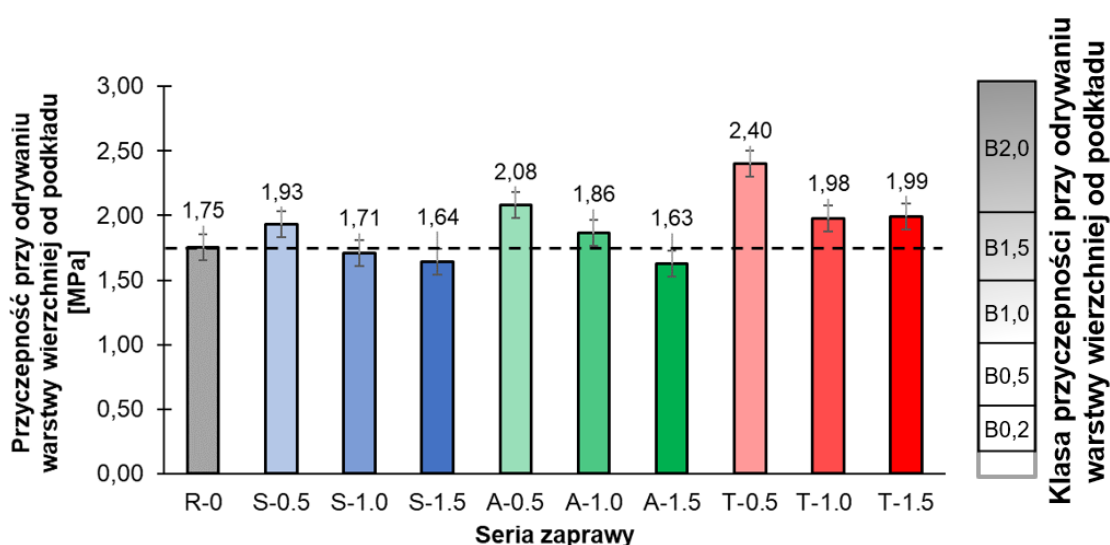
Z przeprowadzonych badań właściwości wytrzymałościowych stwardniałych zapraw użytych do wykonania cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości wynika, że zastosowanie każdej z badanych nanocząstek skutkuje nieznacznym obniżeniem wytrzymałości na ściskanie w stosunku do zaprawy referencyjnej maksymalnie o około 15 %

oraz, że niezależnie od ilości dodatku oraz rodzaju badanej nanocząstki wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zapraw ulegają pogorszeniu maksymalnie o około 20%. Pomimo pogorszenia właściwości wytrzymałościowych wszystkie zaprawy mieszczą się w klasach wytrzymałości przyporządkowanych dla warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości.

5.4. Właściwości adhezyjne

5.4.1. Przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu

Rys. 57 przedstawia wyniki badań właściwości adhezyjnych cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości od podkładu.



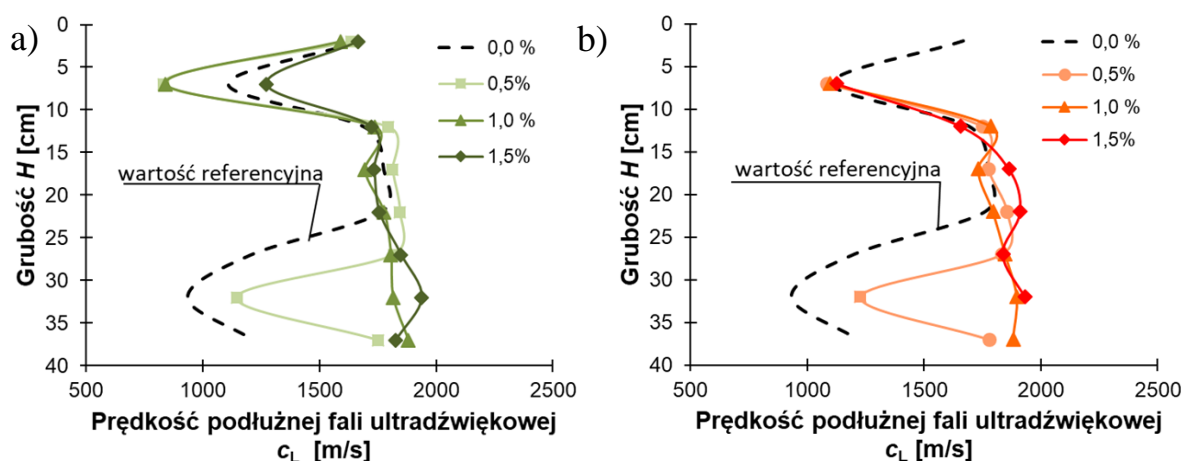
Rys. 57. Wyniki badań właściwości adhezyjnych cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości od podkładu

Z przeprowadzonych badań właściwości adhezyjnych cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości wynika, że:

- dodatek nanocząstek SiO_2 wpływa w niewielkim stopniu na przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu w stosunku do zaprawy referencyjnej,
- w przypadku dodatku 0,5 % nanocząstek Al_2O_3 widoczny jest dużo bardziej korzystny wpływ na zespolenie warstwy wierzchniej z podkładem,
- dodatek 0,5 % nanocząstek TiO_2 najkorzystniej wpływa na przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu.

5.4.2. Badania uzupełniające przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej w funkcji grubości warstwy wierzchniej

Rys. 58 przedstawia uzupełniające wyniki badań przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej w funkcji grubości cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości dla badanych zapraw modyfikowanych dodatkiem nanocząstek Al_2O_3 oraz TiO_2 .



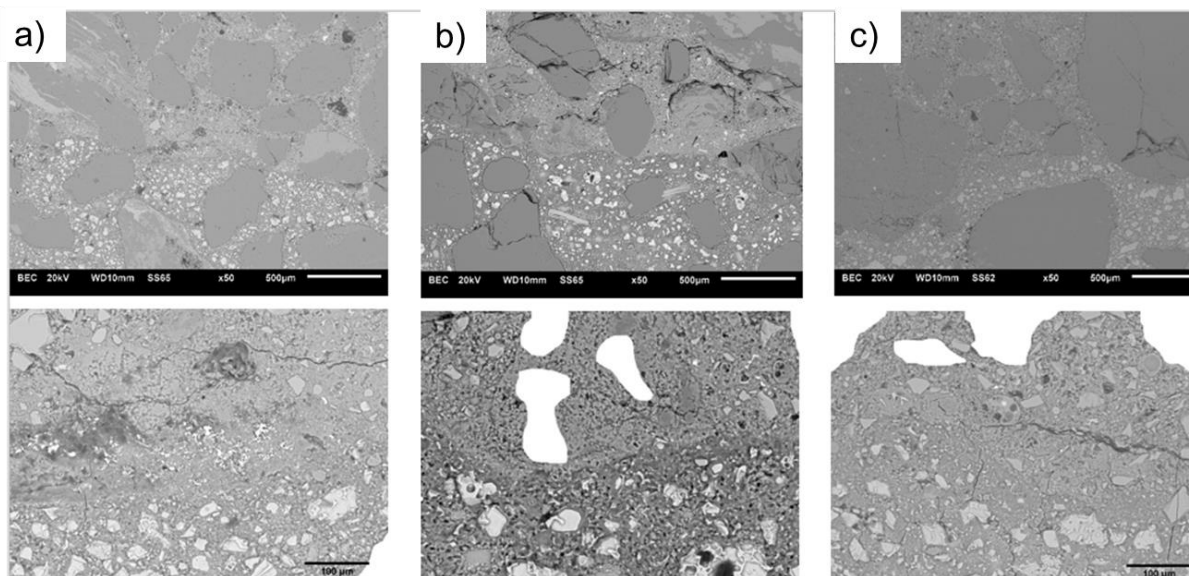
Rys. 58. Uzupełniające wyniki badań przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej w funkcji grubości cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości dla badanych zapraw modyfikowanych dodatkiem nanocząstek: a) Al_2O_3 , b) TiO_2

Z przeprowadzonych badań uzupełniających przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej w funkcji grubości warstw wierzchnich wynika, że zastosowanie dodatku nanocząstek Al_2O_3 i TiO_2 powoduje, że na grubości do 25 mm licząc od strefy zespolenia z podkładem betonowym zaprawa cementowa jest bardziej jednorodna w porównaniu z zaprawą referencyjną, co może być przyczyną wzrostu przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu. W celu potwierdzenia tych przypuszczeń wykonano badania struktury zaprawy w strefie zespolenia z podkładem metodą skaningowej mikroskopii elektronowej.

W przypadku dodatku każdej z badanych nanocząstek zaobserwowano znaczne obniżenie współczynnika zmienności uzyskanych wartości przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu w stosunku do zaprawy referencyjnej. Potwierdzają to przedstawione wyżej badania przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej.

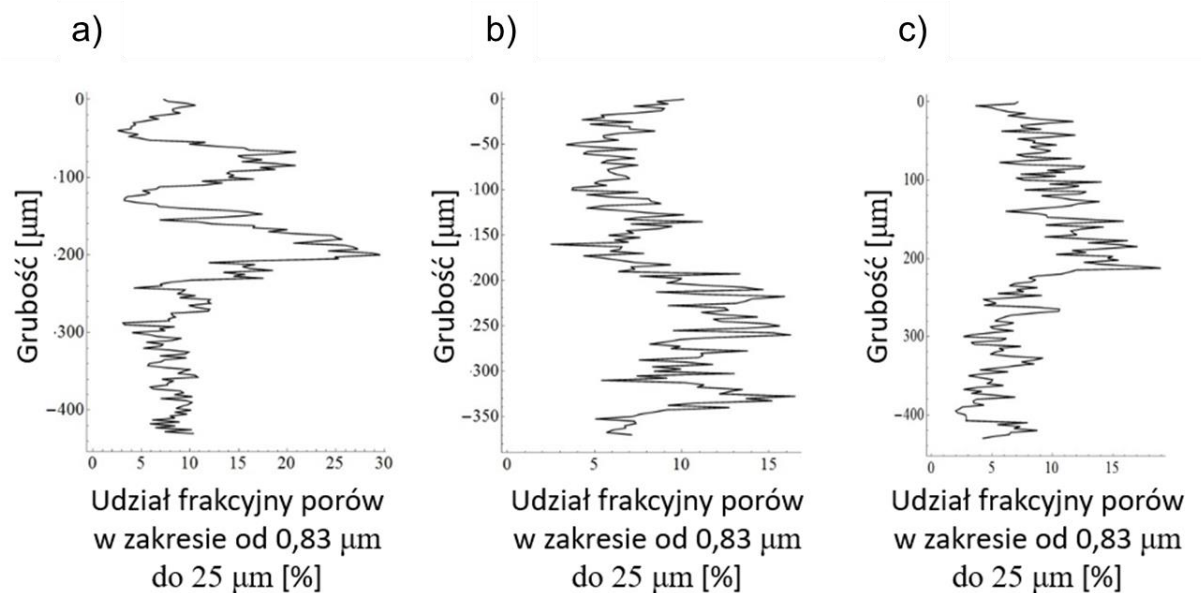
5.4.3. Badania uzupełniające struktury zaprawy w strefie zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego

Rys. 59 przedstawia obrazy wykonane mikroskopem elektronowym przedstawiające strefę zespolenia warstwy wierzchniej referencyjnej, a także warstw wierzchnich z dodatkiem 0,5% nanocząstek Al_2O_3 oraz z dodatkiem 0,5% nanocząstek TiO_2 . Poniżej przedstawiono obszar strefy zespolenia w powiększeniu.



Rys. 59. Obrazy z mikroskopu elektronowego stref zespolenia dla zaprawy: a) referencyjnej, b) z dodatkiem 0,5 % Al_2O_3 , c) z dodatkiem 0,5 % TiO_2 (opracowanie własne na podstawie [148]-[150])

Z kolei na Rys. 60 przedstawiono udział frakcyjny porów w zakresie od $0,83 \mu\text{m}$ do $25 \mu\text{m}$ w strefie zespolenia dla zaprawy referencyjnej, z dodatkiem 0,5 % Al_2O_3 , z dodatkiem 0,5 % TiO_2 . Jak widać na rysunkach dla zaprawy referencyjnej udział frakcyjny porów sięga nawet 25% w strefie zespolenia, co nie ma miejsca w przypadku nanocząstek Al_2O_3 oraz TiO_2 w przypadku których zaobserwowano wzrost przyczepności. Co jest zgodne z doniesieniami literaturowymi.



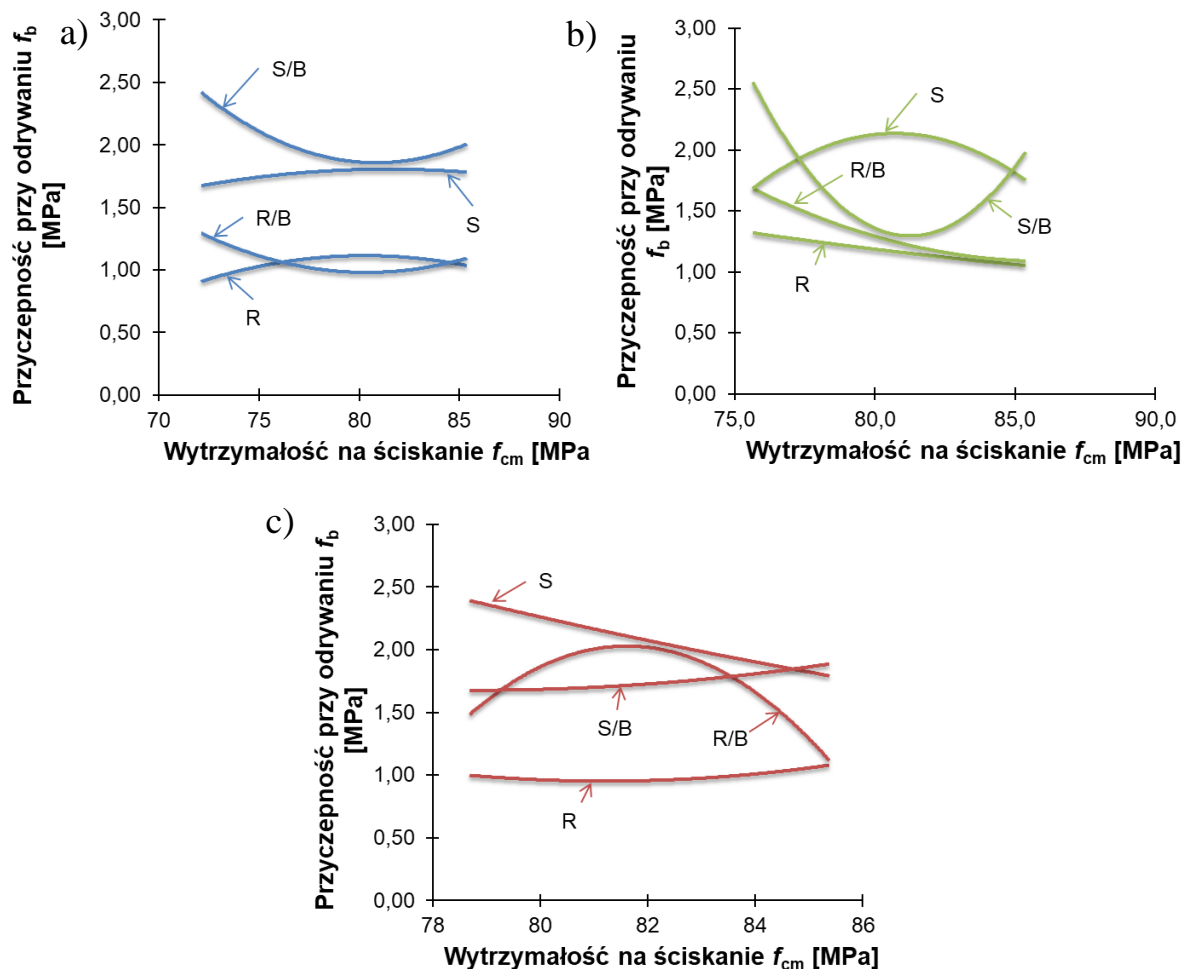
Rys. 60. Udział frakcyjny porów w zakresie od $0,83 \mu\text{m}$ do $25 \mu\text{m}$ w strefie zespolenia dla zaprawy: a) referencyjnej, b) z dodatkiem $0,5 \%$ Al_2O_3 , c) z dodatkiem $0,5 \%$ TiO_2 (opracowanie własne na podstawie [148]-[150])

Z przeprowadzonych badań uzupełniających cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości wynika, że zastosowanie dodatku nanocząstek Al_2O_3 i TiO_2 w ilości $0,5\%$ skutkuje zmniejszeniem udziału frakcyjnego porów w strefie zespolenia o około 13% w przypadku Al_2O_3 oraz o około 19% w przypadku TiO_2 w stosunku do zaprawy referencyjnej.

Potwierdza to przypuszczenia, że przyczyną wzrostu przyczepności przy odrywaniu jest większa jednorodność zapraw z dodatkiem nanocząstek w strefie zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem w porównaniu z zaprawą referencyjną.

5.4.4. Wpływ średniej wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej na jej przyczepność przy odrywaniu od podkładu

Na Rys. 61 przedstawiono jak kształtuje się zależność między średnimi wartościami przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu od średnich wartości wytrzymałości na ściskanie f_{cm} zaprawy cementowej, z której warstwa wierzchnia została wykonana.

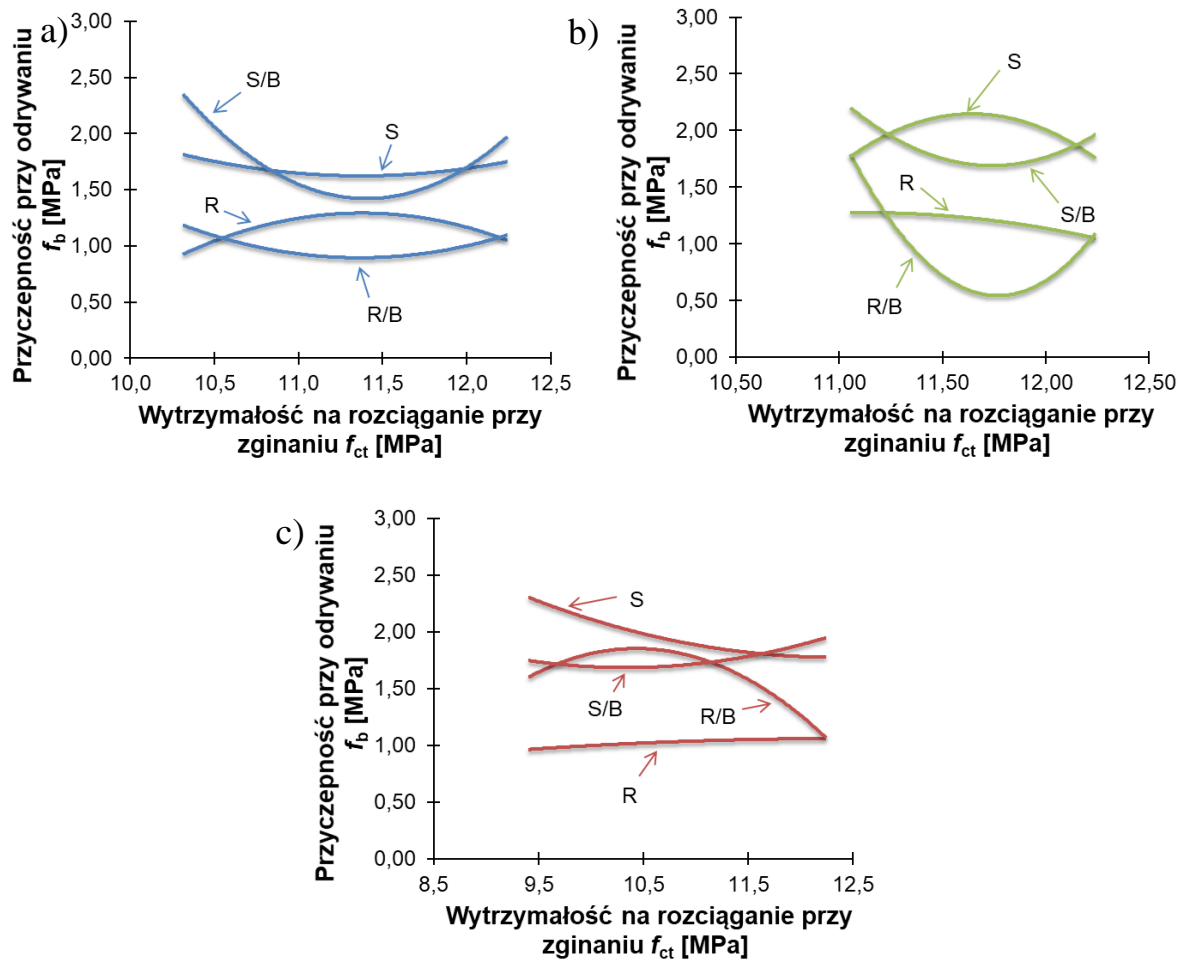


Rys. 61. Zależność między średnimi wartościami przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu od średnich wartości wytrzymałości na ściskanie f_{cm} badanych zapraw modyfikowanych wybranymi nanocząstkami: a) SiO_2 , b) Al_2O_3 , c) TiO_2 (opracowanie własne na podstawie [150])

Z Rys. 61 wynika, że bez względu na metodę przygotowania podkładu betonowego wartość przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu nie zależy od wytrzymałości na ściskanie f_{cm} zaprawy z dodatkiem nanocząstek tlenku krzemu, nanocząstek tlenku tytanu oraz nanocząstek tlenku aluminium. Dodatkowo widoczny jest znaczny wpływ metody przygotowania powierzchni podkładu (przed nałożeniem warstwy wierzchniej), gdyż największe wartości przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu uzyskano dla powierzchni śrutowanej ze środkiem szepnym i powierzchni śrutowanej oraz najniższe dla powierzchni zatartej z naniesionym środkiem szepnym i zatartej.

5.4.5. Wpływ wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zaprawy cementowej na jej przyczepność przy odrywaniu od podkładu

Z kolei na Rys. 62 przedstawiono jak kształtuje się zależność między średnimi wartościami przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu od średnich wartości wytrzymałości na zginanie f_{ct} zaprawy cementowej, z której warstwa wierzchnia została wykonana.



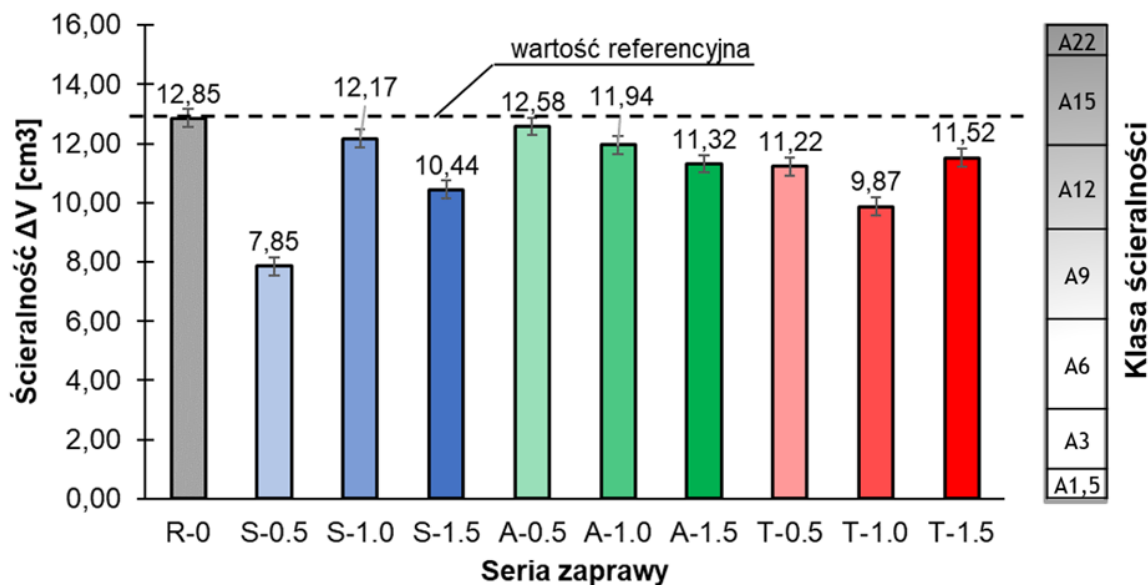
Rys. 62. Zależność między średnimi wartościami przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu od średnich wartości wytrzymałości na zginanie f_{ct} badanych zapraw modyfikowanych wybranymi nanocząstkami: a) SiO₂, b) Al₂O₃, c) TiO₂ (opracowanie własne na podstawie [150])

Z Rys. 62 wynika, że bez względu na sposób przygotowania powierzchni podkładu wartości przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu nie zależą od wytrzymałości na zginanie zapraw z dodatkiem nanocząstek SiO₂, Al₂O₃ oraz TiO₂.

5.5. Właściwości funkcjonalne warstwy wierzchniej

5.5.1. Ścieralność

Rys. 63 przedstawia analizę porównawczą wyników badań ścieralności zapraw cementowych w zależności od zawartości nanocząstek w stosunku do masy cementu.

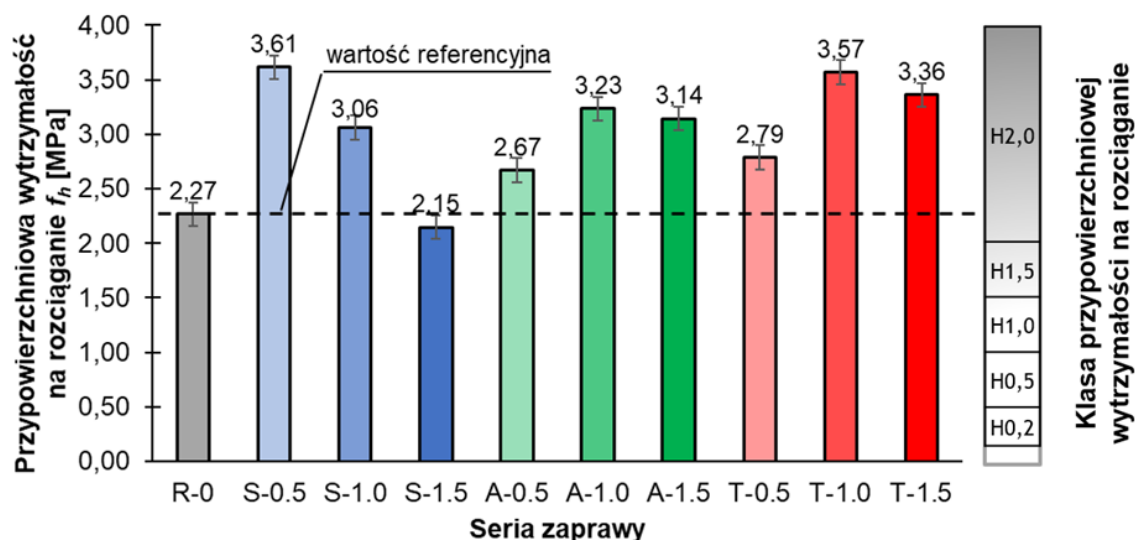


Rys. 63. Wyniki badań ścieralności zapraw cementowych w zależności od zawartości nanocząstek w stosunku do masy cementu jako ubytek objętości ΔV

Z Rys. 63 wynika, że zaprawa z dodatkiem nanocząstek SiO_2 oraz TiO_2 w każdej użytej w badaniach ilości charakteryzuje się mniejszą ścieralnością w porównaniu do zaprawy referencyjnej. W przypadku zastosowania dodatku nanocząstek Al_2O_3 w ilości 1 % oraz 1,5 % ścieralność zaprawy ulega zmniejszeniu w stosunku do zaprawy referencyjnej.

5.5.2. Przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie zaprawy warstwy wierzchniej

Rys. 64 przedstawia wyniki badań przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie f_h warstwy wierzchniej w zależności od zawartości nanocząstek w stosunku do masy cementu.

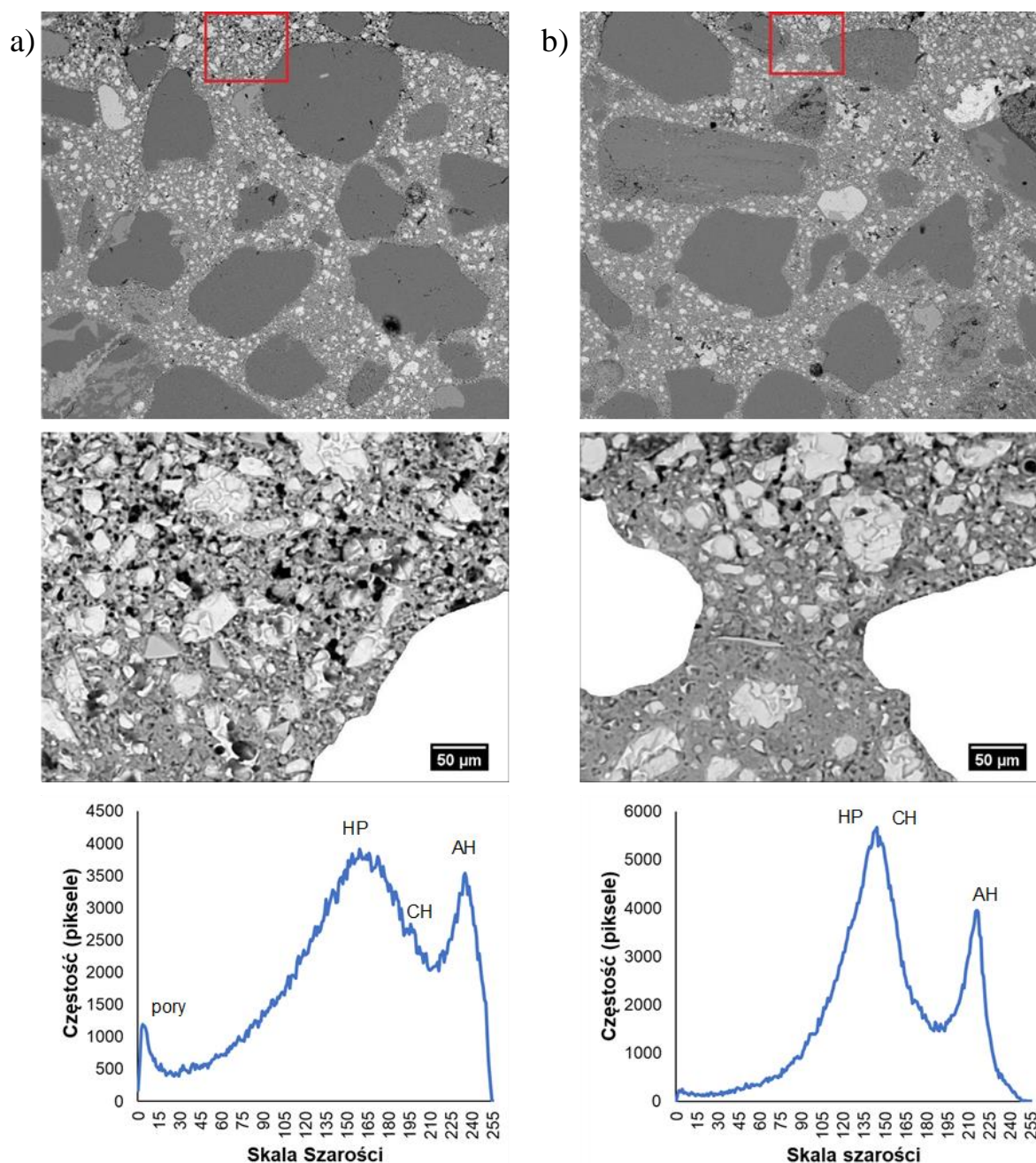


Rys. 64. Wyniki badań przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie f_h zaprawy cementowej metodą pull-of

Z Rys. 64 wynika, że w przypadku dodatku 0,5 % i 1 % nanocząstek SiO_2 następuje wzrost przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie zaprawy warstwy wierzchniej. W przypadku dodatku nanocząstek TiO_2 oraz Al_2O_3 w każdej z badanych ilości (0,5 %, 1 %, 1,5 %) następuje wzrost przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie zaprawy warstwy wierzchniej w stosunku do zaprawy referencyjnej.

5.5.3. Badania uzupełniające struktury zaprawy w strefie przypowierzchniowej warstwy wierzchniej z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego

W celu potwierdzenia poprawy właściwości funkcjonalnych warstwy wierzchniej wykonanej z zaprawy z dodatkiem nanocząstek SiO_2 w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu w stosunku do zaprawy referencyjnej w dalszej części pracy przedstawiono wyniki badań z wykorzystaniem SEM próbek o wymiarach 11 mm x 11 mm x 11 mm pobranych ze strefy przypowierzchniowej warstw wierzchnich wykonanych z tych dwóch zapraw. Aby uniknąć efektu brzegu [107], w analizie posłużono się jedynie częścią obrazu (BSE) z mikroskopu elektronowego o szerokości 0,44 mm i wysokości 0,33 mm. Na Rys. 65 przedstawiono obrazy (BSE) z mikroskopu elektronowego oraz histogramy skali szarości.



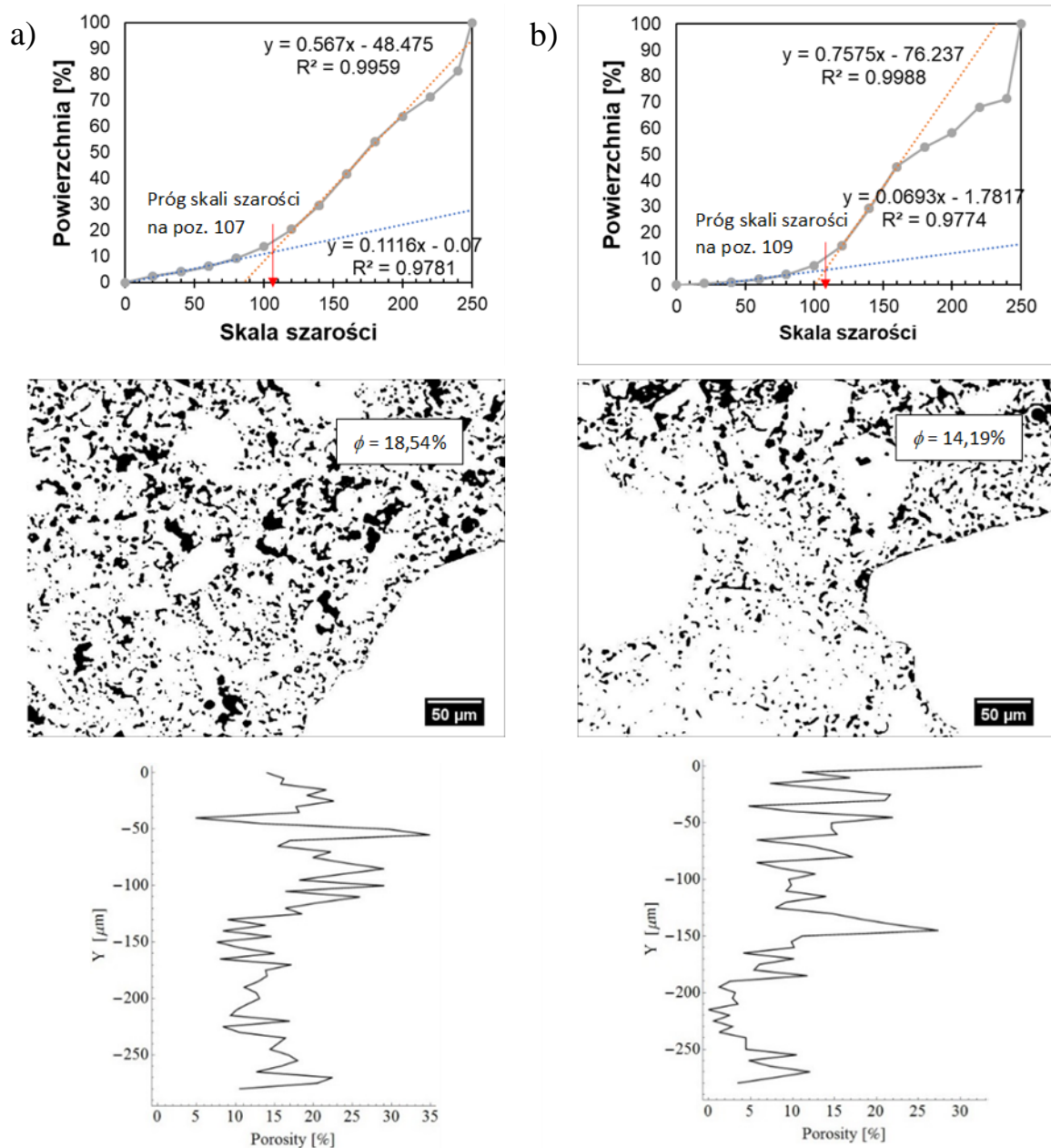
Rys. 65. Obrazy (BSE) z mikroskopu elektronowego wraz z histogramami skali szarości dla próbek o wymiarach 11 mm x 11 mm x 11 mm pobranych z strefy przypowierzchniowej:

a) zaprawy referencyjnej, b) zaprawy zawierającej 0,5% nanocząstek SiO₂ w stosunku do masy cementu (HP – produkty hydratacji, CH – wodorotlenek wapnia, AH – nieshydrytowane ziarna cementu) (opracowanie własne na podstawie [148])

Na histogramie dotyczącym zaprawy referencyjnej (Rys. 65a) widoczne są trzy główne piki odpowiadające fazom: porów, produktów hydratacji oraz bezwodnego cementu. Widoczny jest również znacznie mniejszy pik odpowiadający fazie wodorotlenku wapnia. Z kolei na histogramie dotyczącym zaprawy z dodatkiem 0,5% nanocząstek SiO₂ widoczne są tylko dwa

piki (Rys. 65b). Jeden odpowiadający jednocześnie fazom produktów hydratacji i wodorotlenku wapnia, a drugi odpowiadający fazie bezwodnego cementu. Z Rys. 65 wynika, że porowatość próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy zawierającej 0,5% nanocząstek SiO₂ w stosunku do masy cementu jest niższa w stosunku do porowatości próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy referencyjnej. Może to być wynikiem spadku stosunku wodno-cementowego w strefie przypowierzchniowej zaprawy zawierającej 0,5% nanocząstek SiO₂ w stosunku do zaprawy referencyjnej.

W efekcie binaryzacji na Rys. 66 przedstawiono zbiorcze histogramy skali szarości oraz obraz porów kapilarnych wyodrębnionych z obrazów (BSE) z mikroskopu elektronowego przedstawionych na Rys. 66.

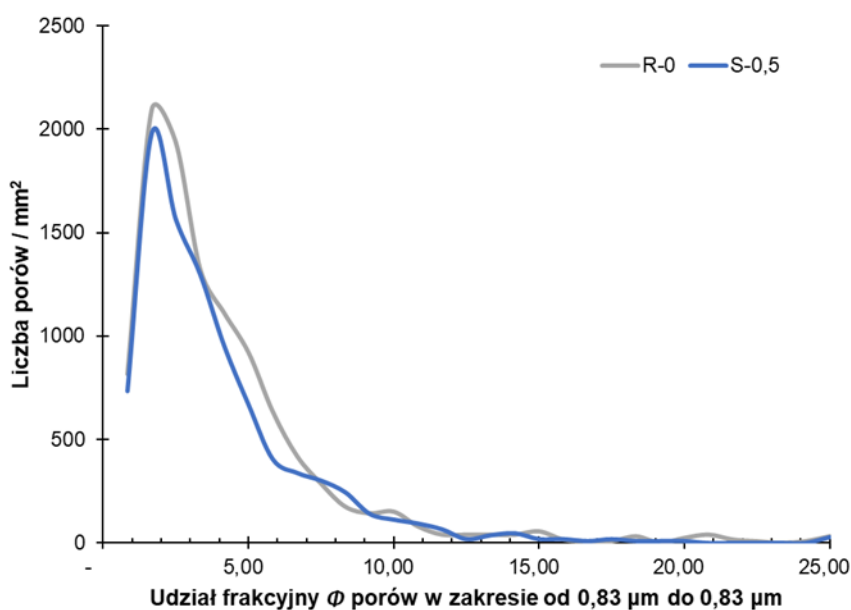


Rys. 66. Zbiórny histogram skali szarości wraz z wysegmentowanymi porami i przebiegiem udziału frakcyjnego porów kapilarnych ϕ w funkcji grubości próbek pobranych z strefy przypowierzchniowej warstwy wierzchniej dla: a) zaprawy referencyjnej, b) zaprawy zawierającej 0,5% nanocząstek SiO₂ w stosunku do masy cementu (opracowanie własne na podstawie [148])

Jak wynika z histogramów skali szarości przedstawionych na Rys. 66 próg skali szarości stanowiący granicę pomiędzy fazami porów i produktów hydratacji wyznaczony zgodnie z metodologią podaną w [154] znajduje się w podobnym zakresie skali szarości tj. 107 dla

próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy referencyjnej oraz 109 dla próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy z dodatkiem 0,5% SiO₂. Z Rys. 66 wynika też, że całkowity udział frakcyjny porów kapilarnych ϕ w zakresie od 0,83 do 25 μm dla próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy referencyjnej jest większy o około 31 % niż udział dla próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy z dodatkiem 0,5% SiO₂. Z Rys. 66 wynika również, że zaprawa z dodatkiem 0,5% nanocząstek SiO₂ cechuje się dużo mniejszym udziałem frakcyjnym porów od głębokości poniżej 100 μm od powierzchni warstwy wierzchniej niż zaprawa referencyjna.

Na Rys. 67 przedstawiono udział frakcyjny porów kapilarnych ϕ w zakresie od 0,83 do 25 μm w przeliczeniu na 1 mm^2 matrycy cementowej.

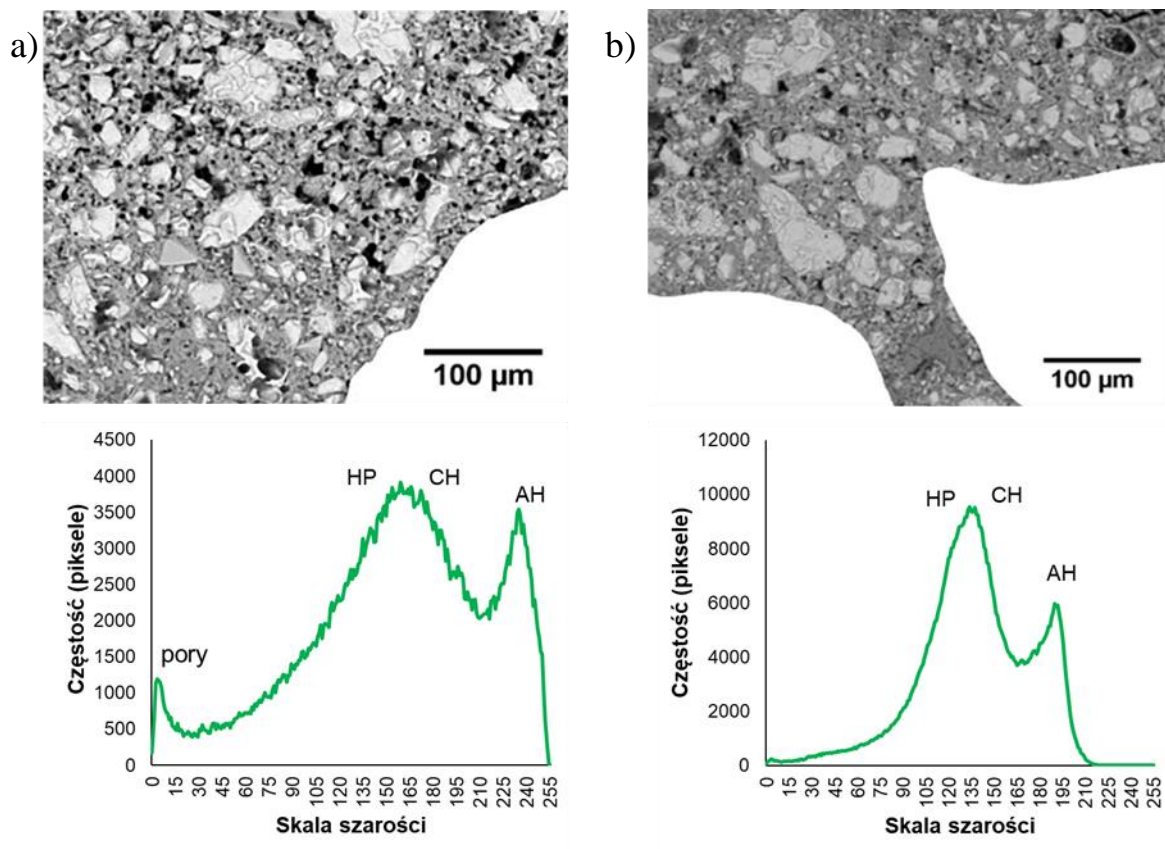


Rys. 67. Udział frakcyjny ϕ porów w zakresie od 0,83 do 25 μm na jednostkę powierzchni matrycy (opracowanie własne na podstawie [148])

Na podstawie analizy Rys. 67 można potwierdzić, że matryca cementowa próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy z dodatkiem 0,5% nanocząstek SiO₂ jest mniej porowata niż matryca próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy referencyjnej. Dla obu zapraw najwięcej porów występuje w zakresie od 0,83 do 1,67 μm . Krzywa ilości porów dla obu zapraw ma podobny przebieg, ale w przypadku zaprawy referencyjnej wskazuje ona na większy udział porów w zakresie od 1,67 do 7,5 μm .

W celu potwierdzenia poprawy właściwości funkcjonalnych warstwy wierzchniej wykonanej z zaprawy z dodatkiem nanocząstek Al₂O₃ w ilości 0,5% w stosunku do masy

cementu, w stosunku do zaprawy referencyjnej, w dalszej części pracy przedstawiono wyniki badań z wykorzystaniem SEM próbek o wymiarach 11 mm x 11 mm x 11 mm pobranych ze strefy przypowierzchniowej warstw wierzchnich wykonanych z tych dwóch zapraw. Aby uniknąć efektu brzegu, w analizie posłużono się jedynie częścią obrazu (BSE) z mikroskopu elektronowego. Na Rys. 68 przedstawiono obrazy (BSE) z mikroskopu elektronowego oraz histogramy skali szarości.

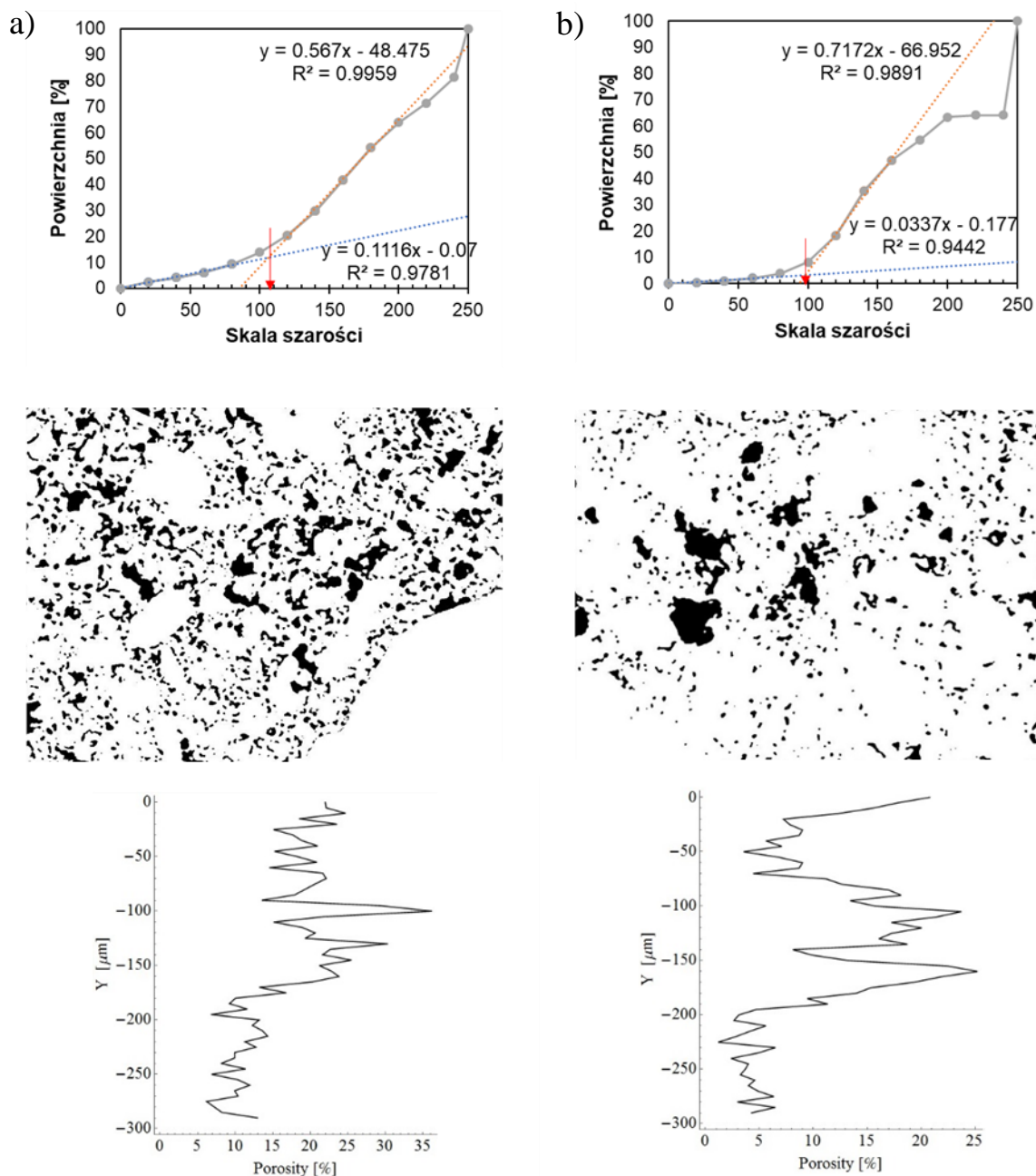


Rys. 68. Obrazy (BSE) z mikroskopu elektronowego wraz z histogramami skali szarości dla próbek o wymiarach 11 mm x 11 mm x 11 mm pobranych z strefy przypowierzchniowej: a) zaprawy referencyjnej, b) zaprawy zawierającej 0,5% nanocząstek Al₂O₃ w stosunku do masy cementu (wyjaśnienie symboli: HP – produkty hydratacji, CH – wodorotlenek wapnia, AH – nieshydrytowane ziarna cementu) (opracowanie własne na podstawie [149])

Na histogramie dotyczącym zaprawy referencyjnej (Rys. 68a) widoczne są trzy główne piki odpowiadające fazom: porów, produktów hydratacji oraz bezwodnego cementu. Widoczny jest również znacznie mniejszy pik odpowiadający fazie wodorotlenku wapnia. Z kolei na histogramie dotyczącym zaprawy z dodatkiem 0,5% nanocząstek Al₂O₃ widoczne są tylko dwa

piki (Rys. 68b). Jeden odpowiadający jednocześnie fazom produktów hydratacji i wodorotlenku wapnia, a drugi odpowiadający fazie bezwodnego cementu. Z Rys. 68 wynika, że porowatość próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy zawierającej 1% nanocząstek Al_2O_3 w stosunku do masy cementu jest niższa w stosunku do porowatości próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy referencyjnej. Może to być wynikiem spadku stosunku wodno-cementowego w strefie przypowierzchniowej zaprawy zawierającej 0,5% nanocząstek Al_2O_3 w stosunku do zaprawy referencyjnej.

W efekcie binaryzacji na Rys. 69 przedstawiono zbiorcze histogramy skali szarości oraz obraz porów kapilarnych wyodrębnionych z obrazów (BSE) z mikroskopu elektronowego przedstawionych na Rys. 69. Rys. 69a odnosi się do strefy przypowierzchniowej warstwy wierzchniej z zaprawy referencyjnej, a Rys. 69b do warstwy wierzchniej z zaprawy z dodatkiem 0,5% nanocząstek Al_2O_3 . Na skumulowanych wykresach skali szarości czerwoną strzałką zaznaczono próg skali szarości porów (zgodnie z procedurą [154]). Następnie został wyznaczony udział frakcyjny porów dla zaprawy referencyjnej 18,54% oraz dla zaprawy z dodatkiem nanocząstek 11,16%.

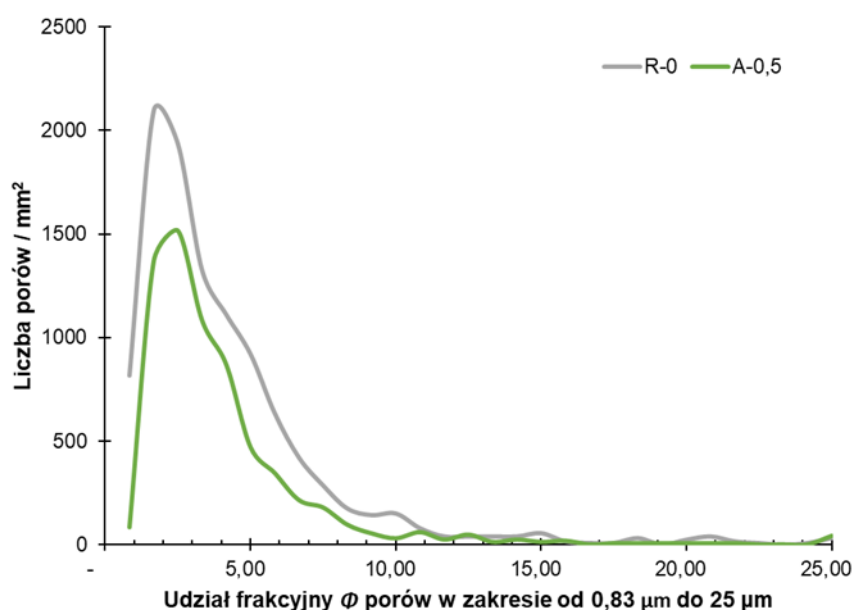


Rys. 69. Skumulowane histogramy szarości, obrazy wysegmentowanych porów oraz wykresy zależności udziału frakcyjnego porów w funkcji grubości warstwy wierzchniej (w strefie przypowierzchniowej warstwy wierzchniej): a) zaprawa referencyjna, b) zaprawa z dodatkiem 0,5% nanocząstek Al_2O_3 (opracowanie własne na podstawie [149])

Z wykresów udziału frakcyjnego porów w funkcji grubości warstwy wierzchniej przedstawionych na Rys. 69 wynika, że zaprawa z dodatkiem 0,5% nanocząstek Al_2O_3 cechuje się mniejszym udziałem frakcyjnym porów do głębokości 200 μm od powierzchni warstwy

wierzchniej. Wartość tego udziału frakcyjnego porów wynosi około 15%, a dla zaprawy referencyjnej około 20%. Na głębokości poniżej 200 μm wartość udziału frakcyjnego porów dla obu zapraw zmniejsza się i wynosi około 5% dla zaprawy z dodatkiem nanocząstek oraz około 10% dla zaprawy referencyjnej.

Na Rys. 70 przedstawiono z kolei udział frakcyjny porów kapilarnych ϕ w zakresie od 0,83 do 25 μm w przeliczeniu na 1 mm^2 matrycy cementowej zaprawy referencyjnej oraz zaprawy z dodatkiem 0,5% nanocząstek Al_2O_3 .



Rys. 70. Udział frakcyjny ϕ porów w zakresie od 0,83 do 25 μm na jednostkę powierzchni matrycy (opracowanie własne na podstawie [149])

Z Rys. 70 wynika, że matryca z dodatkiem 0,5% nanocząstek Al_2O_3 cechuje się mniejszym udziałem frakcyjnym porów, a szczególnie w zakresie od 0,83 do 10 μm . W obu analizowanych matrycach największa ilość porów występuje w przedziale od 2 do 3 μm (około 2100 porów na mm^2 w zaprawie referencyjnej oraz około 1500 porów na mm^2 w przypadku zaprawy z dodatkiem nanocząstek Al_2O_3). Całkowity udział frakcyjny porów w matrycy wyniósł około 18,5% dla zaprawy referencyjnej oraz około 11,2% dla zaprawy z dodatkiem 0,5% nanocząstek Al_2O_3 .

5.6. Wyniki statystycznej analizy wyników badań

W tabelach 10-14 zestawiono wyniki rezultatów sprawdzenia niezbędnej liczby próbek n potrzebnych do przeprowadzenia badań właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych i funkcjonalnych warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości dla wszystkich serii zapraw.

Tab. 10. Rezultaty sprawdzenia niezbędnej liczby próbek n potrzebnych do przeprowadzenia badania wytrzymałości na ściskanie

Seria	Wartość średnia \bar{x}	Odchylenie standardowe s	Współczynnik zmienności v	t_α	n	ϑ	t_α/\sqrt{n}		ϑ/v
R-0	85,4	1,44	0,0169	2,13	5	0,1	0,953	<	5,913
S-0.5	80,1	5,22	0,0651	2,13	5	0,1	0,953	<	1,536
S-1.0	72,1	8,79	0,1219	2,01	6	0,1	0,821	>	0,820
S-1.5	76,9	1,11	0,0145	2,13	5	0,1	0,953	<	6,920
A-0.5	79,3	2,67	0,0336	2,13	5	0,1	0,953	<	2,975
A-1.0	76,3	5,92	0,0775	2,13	5	0,1	0,953	<	1,290
A-1.5	75,7	3,76	0,0497	2,13	5	0,1	0,953	<	2,012
T-0.5	78,7	2,71	0,0344	2,13	5	0,1	0,953	<	2,909
T-1.0	84,1	2,06	0,0245	2,13	5	0,1	0,953	<	4,086
T-1.5	82,3	1,75	0,0213	2,13	5	0,1	0,953	<	4,696

Tab. 11. Rezultaty sprawdzenia niezbędnej liczby próbek n potrzebnych do przeprowadzenia badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Seria	Wartość średnia \bar{x}	Odchylenie standardowe s	Współczynnik zmienności v	t_α	n	ϑ	t_α/\sqrt{n}		ϑ/v
R-0	12,24	0,67	0,0551	2,02	6	0,1	0,825	<	1,815
S-0.5	10,42	1,10	0,1054	2,02	6	0,1	0,825	<	0,949
S-1.0	10,31	1,23	0,1196	2,02	6	0,1	0,825	<	0,836
S-1.5	10,75	1,42	0,1317	1,94	7	0,1	0,733	<	0,759
A-0.5	11,20	1,43	0,1281	1,94	7	0,1	0,733	<	0,781
A-1.0	11,05	0,82	0,0746	2,02	6	0,1	0,825	<	1,341
A-1.5	11,14	1,19	0,1065	2,02	6	0,1	0,825	<	0,939
T-0.5	9,41	0,74	0,0792	2,02	5	0,1	0,903	<	1,263
T-1.0	10,98	0,93	0,0848	2,02	6	0,1	0,825	<	1,179
T-1.5	9,86	1,26	0,1280	1,94	7	0,1	0,733	<	0,781

Tab. 12. Rezultaty sprawdzenia niezbędnej liczby próbek n potrzebnych do przeprowadzenia badania przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości od podkładu betonowego

Seria	Wartość średnia \bar{x}	Odchylenie standardowe s	Współczynnik zmienności v	t_α	n	ϑ	t_α/\sqrt{n}		ϑ/v
R-0	1,75	0,05	0,0265	2,92	3	0,1	1,686	<	3,776
S-0.5	1,93	0,02	0,0104	2,92	3	0,1	1,686	<	9,650
S-1.0	1,71	0,16	0,0958	2,13	5	0,1	0,953	<	1,043
S-1.5	1,64	0,10	0,0601	2,35	4	0,1	1,175	<	1,664
A-0.5	2,08	0,08	0,0408	2,92	3	0,1	1,686	<	2,451
A-1.0	1,86	0,05	0,0285	2,92	3	0,1	1,686	<	3,507
A-1.5	1,63	0,06	0,0368	2,92	3	0,1	1,686	<	2,717
T-0.5	2,40	0,11	0,0450	2,92	3	0,1	1,686	<	2,222
T-1.0	1,98	0,07	0,0356	2,92	3	0,1	1,686	<	2,808
T-1.5	1,99	0,11	0,0528	2,92	3	0,1	1,686	<	1,893

Tab. 13. Rezultaty sprawdzenia niezbędnej liczby próbek n potrzebnych do przeprowadzenia badania ścieralności zaprawy cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości

Seria	Wartość średnia \bar{x}	Odchylenie standardowe s	Współczynnik zmienności v	t_α	n	ϑ	t_α/\sqrt{n}		ϑ/v
R-0	12,85	0,75	0,0581	2,92	3	0,1	1,686	<	1,721
S-0.5	7,85	0,73	0,0929	2,13	5	0,1	0,953	<	1,077
S-1.0	12,17	0,77	0,0628	2,35	4	0,1	1,175	<	1,591
S-1.5	10,44	0,56	0,0539	2,92	3	0,1	1,686	<	1,854
A-0.5	12,58	0,92	0,0732	2,35	4	0,1	1,175	<	1,366
A-1.0	11,94	0,45	0,0376	2,92	3	0,1	1,686	<	2,660
A-1.5	11,32	0,28	0,0251	2,92	3	0,1	1,686	<	3,984
T-0.5	11,22	0,20	0,0175	2,92	3	0,1	1,686	<	5,725
T-1.0	9,87	0,27	0,0273	2,92	3	0,1	1,686	<	3,669
T-1.5	11,52	0,29	0,0247	2,92	3	0,1	1,686	<	4,041

Tab. 14. Rezultaty sprawdzenia niezbędnej liczby próbek n potrzebnych do przeprowadzenia badania przypoверхниowej wytrzymałości na rozciąganie warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości

Seria	Wartość średnia \bar{x}	Odchylenie standardowe s	Współczynnik zmienności v	t_α	n	ϑ	t_α/\sqrt{n}		ϑ/v
R-0	2,27	0,05	0,0243	2,92	3	0,1	1,686	<	4,121
S-0.5	3,61	0,28	0,0765	2,35	4	0,1	1,175	<	1,307
S-1.0	3,06	0,25	0,0823	2,35	4	0,1	1,175	<	1,214
S-1.5	2,15	0,14	0,0637	2,35	4	0,1	1,175	<	1,570
A-0.5	2,67	0,14	0,0524	2,92	3	0,1	1,686	<	1,907
A-1.0	3,23	0,22	0,0680	2,35	4	0,1	1,175	<	1,470
A-1.5	3,14	0,20	0,0628	2,35	4	0,1	1,175	<	1,593
T-0.5	2,79	0,25	0,0878	2,01	5	0,1	0,899	<	1,139
T-1.0	3,57	0,28	0,0792	2,35	4	0,1	1,175	<	1,263
T-1.5	3,36	0,28	0,0836	2,35	4	0,1	1,175	<	1,196

Analizując powyższe tabele dotyczące badań właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych oraz funkcjonalnych stwierdzono, że w zdecydowanej większości przypadków liczba próbek przeznaczonych do badań była wystarczająca.

6. ANALIZA WYDAJNOŚCI MECHANICZNEJ WARSTW WIERZCHNICH MODYFIKOWANYCH WYBRANYMI NANOCZĄSTKAMI

W celu wyselekcjonowania na drodze badawczej rodzaju i ilości dodatku tych nanocząstek, dla których zauważalna będzie poprawa wydajności mechanicznej cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości w podłogach z punktu widzenia ich podstawowych właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych i funkcjonalnych posłużono się współczynnikiem wydajności mechanicznej (MPR, *ang. mechanical performance ratio*) bazując na propozycji z pracy [78].

Do analizy wydajności mechanicznej warstw wierzchnich modyfikowanych wybranymi nanocząstkami wykorzystano wyniki badań obejmujące podstawowe właściwości cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości modyfikowanych dodatkiem nanocząstek takie jak wytrzymałość na ściskanie f_{cm} , wytrzymałość na zginanie f_{ct} , przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu f_b , ścieralność zapraw cementowych (ubytek objętości ΔV) oraz przypowierzchniową wytrzymałość na rozciąganie f_t .

Na potrzeby analizy wydajności mechanicznej warstw wierzchnich modyfikowanych wybranymi nanocząstkami poszczególnym właściwościom przyporządkowano różne wagi w zależności warunków w jakich te warstwy miałyby być aplikowane.

Tab. 15. Podstawowe właściwości cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości w podłogach z punktu widzenia ich wydajności mechanicznej

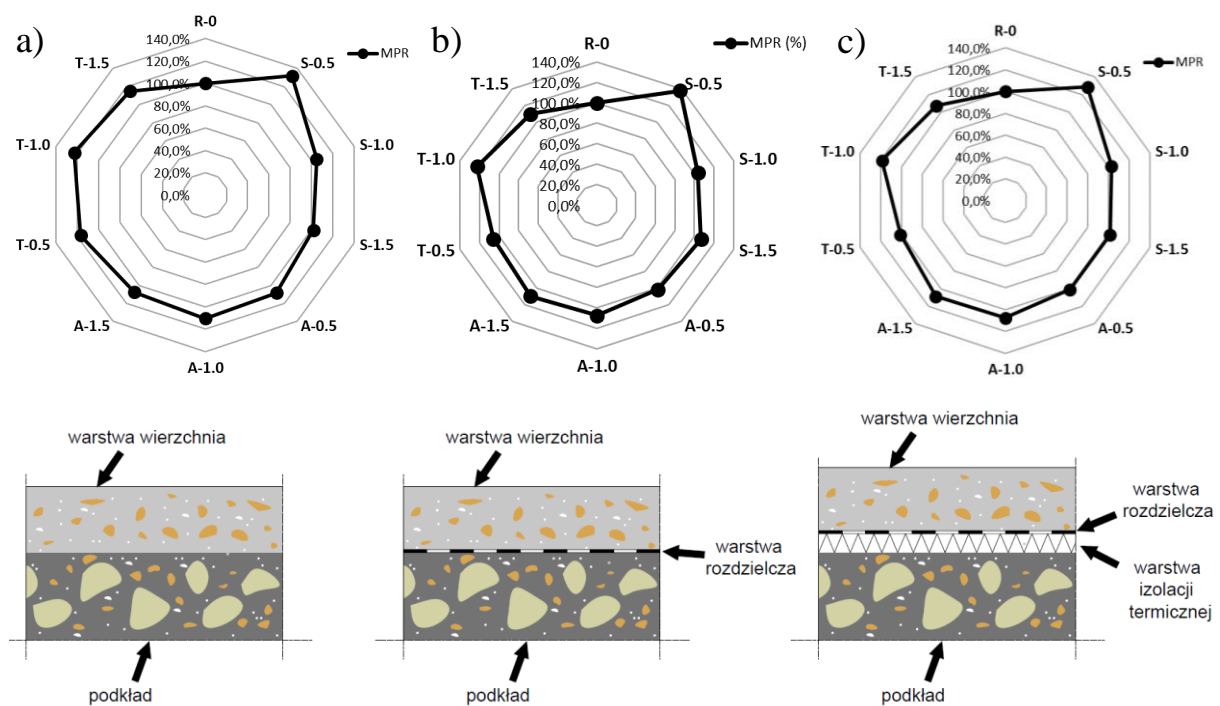
Wariant podłogi	Podstawowe właściwości cementowych warstw z punktu widzenia ich wydajności mechanicznej				
	Właściwości wytrzymałościowe		Właściwości adhezyjne	Właściwości funkcjonalne	
	Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	Przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu	Ścieralność	Przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie
Warstwa wierzchnia stanowiąca warstwę wykończeniową					
Związana z podkładem	○	○	●	●	○
Na warstwie rozdzielczej	○	○	-	●	○
Na warstwie izolacji term.	○	●	-	●	○
Warstwa wierzchnia stanowiąca podłoże pod warstwę wykończeniową					
Związana z podkładem	○	○	●	-	●
Na warstwie rozdzielczej	○	○	-	-	●
Na warstwie izolacji term.	○	●	-	-	●
Oznaczenie właściwości: „●” - decydująca; „○” – dodatkowa; „○” – pomocnicza; „-” - bez znaczenia					

Właściwościom decydującym wymienionym w tabeli powyżej przyporządkowano wagę 3, właściwościom dodatkowym wagę 2 a pomocniczym wagę 1. Zależność wtedy przedstawia się następująco:

$$MPR = \left(\frac{\left(waga \cdot \frac{\text{wartość } X}{\text{wartość referencyjna}} \right) + \left(waga \cdot \frac{\text{wartość } X}{\text{wartość referencyjna}} \right) + (\dots)}{\text{suma wag}} \right) \quad (8)$$

Założono trzy przypadki najczęściej występujące w praktyce budowlanej tj. warstwę wierzchnią związaną z podkładem, warstwę wierzchnią ułożoną na warstwie rozdzielczej oraz

warstwę wierzchnią ułożoną na warstwie izolacji termicznej. Ponadto dla wymienionych wyżej wariantów uwzględniono możliwość nałożenia warstwy wykończeniowej (warstwa wierzchnia stanowiąca podłoże pod warstwę wykończeniową). Z kolei w tym rozdziale skupiono się na rezultatach analizy wydajności mechanicznej na podstawie metodologii przedstawionej w [78] i opisaney w rozdziale 4. Rys. 71 ilustruje analizę wydajności mechanicznej cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach w sytuacji gdy warstwa wierzchnia stanowi warstwę wykończeniową związaną z podkładem, na warstwie rozdzielczej oraz na warstwie izolacji termicznej. Z kolei w Tab. 16, Tab. 17 oraz Tab. 18 przedstawiono szczegółowe wyniki tych analiz.



Rys. 71. Analiza wydajności mechanicznej cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach w sytuacji gdy warstwa wierzchnia stanowi warstwę wykończeniową: a) związana z podkładem, b) na warstwie rozdzielczej, c) na warstwie izolacji termicznej

Tab. 16 Analiza wydajności mechanicznej cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach w sytuacji gdy warstwa wierzchnia stanowi warstwę wykończeniową związaną z podkładem

Seria zaprawy	f_c	f_{ct}	f_b	ΔV	f_h	MPR (%)
R-0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100,0%
S-0.5	0,94	0,85	1,10	1,64	1,59	131,9%
S-1.0	0,84	0,84	0,97	1,06	1,35	104,8%
S-1.5	0,90	0,88	0,94	1,23	0,95	101,8%
A-0.5	0,93	0,92	1,19	1,02	1,18	108,3%
A-1.0	0,89	0,90	1,06	1,08	1,43	110,7%
A-1.5	0,89	0,91	0,93	1,14	1,39	107,7%
T-0.5	0,92	0,77	1,37	1,15	1,23	116,9%
T-1.0	0,99	0,90	1,13	1,30	1,57	123,2%
T-1.5	0,96	0,81	1,14	1,12	1,48	114,9%

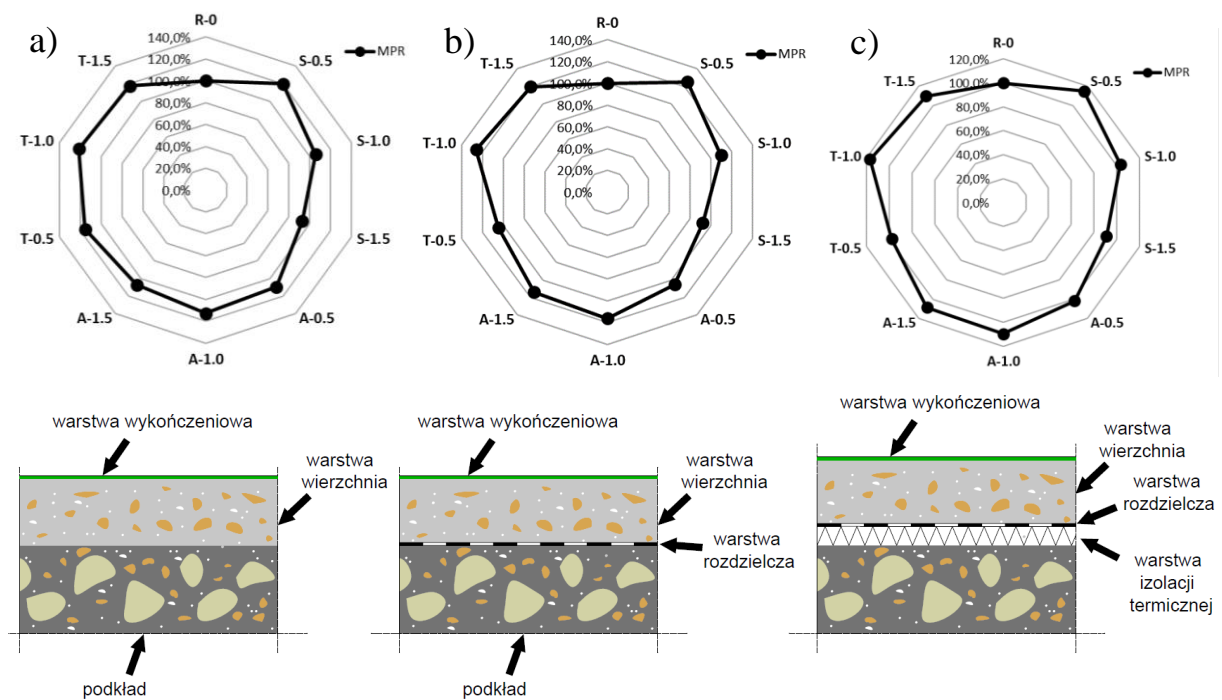
Tab. 17 Analiza wydajności mechanicznej cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach w sytuacji gdy warstwa wierzchnia stanowi warstwę wykończeniową na warstwie rozdzielczej

Seria zaprawy	f_c	f_{ct}	f_b	ΔV	f_h	MPR (%)
R-0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100,0%
S-0.5	0,94	0,85	1,10	1,64	1,59	141,3%
S-1.0	0,84	0,84	0,97	1,06	1,35	108,0%
S-1.5	0,90	0,88	0,94	1,23	0,95	105,3%
A-0.5	0,93	0,92	1,19	1,02	1,18	103,8%
A-1.0	0,89	0,90	1,06	1,08	1,43	112,6%
A-1.5	0,89	0,91	0,93	1,14	1,39	114,0%
T-0.5	0,92	0,77	1,37	1,15	1,23	108,4%
T-1.0	0,99	0,90	1,13	1,30	1,57	127,7%
T-1.5	0,96	0,81	1,14	1,12	1,48	115,5%

Rys. 72 ilustruje analizę wydajności mechanicznej cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach w sytuacji gdy warstwa wierzchnia stanowi podłoże pod warstwę wykończeniową związaną z podkładem, na warstwie rozdzielczej oraz na warstwie izolacji termicznej. Tab. 19, Tab. 20 oraz Tab. 21 przedstawia szczegółowe wyniki analiz

Tab. 18 Analiza wydajności mechanicznej cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach w sytuacji gdy warstwa wierzchnia stanowi warstwę wykończeniową na warstwie izolacji termicznej

Seria zaprawy	f_c	f_{ct}	f_b	ΔV	f_h	MPR (%)
R-0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100,0%
S-0.5	0,94	0,85	1,10	1,64	1,59	128,8%
S-1.0	0,84	0,84	0,97	1,06	1,35	102,7%
S-1.5	0,90	0,88	0,94	1,23	0,95	101,4%
A-0.5	0,93	0,92	1,19	1,02	1,18	101,1%
A-1.0	0,89	0,90	1,06	1,08	1,43	107,6%
A-1.5	0,89	0,91	0,93	1,14	1,39	108,9%
T-0.5	0,92	0,77	1,37	1,15	1,23	101,4%
T-1.0	0,99	0,90	1,13	1,30	1,57	119,2%
T-1.5	0,96	0,81	1,14	1,12	1,48	107,7%



Rys. 72. Analiza wydajności mechanicznej cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach w sytuacji gdy warstwa wierzchnia stanowi podłoże pod warstwę wykończeniową : a) związana z podkładem, b) na warstwie rozdzielczej, c) na warstwie izolacji termicznej

Tab. 19 Analiza wydajności mechanicznej cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach w sytuacji gdy warstwa wierzchnia stanowi podłoże pod warstwę wykończeniową związaną z podkładem

Seria zaprawy	f_c	f_{ct}	f_b	ΔV	f_h	MPR (%)
R-0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100,0%
S-0.5	0,94	0,85	1,10	1,64	1,59	120,2%
S-1.0	0,84	0,84	0,97	1,06	1,35	105,6%
S-1.5	0,90	0,88	0,94	1,23	0,95	92,6%
A-0.5	0,93	0,92	1,19	1,02	1,18	109,7%
A-1.0	0,89	0,90	1,06	1,08	1,43	112,9%
A-1.5	0,89	0,91	0,93	1,14	1,39	107,0%
T-0.5	0,92	0,77	1,37	1,15	1,23	115,7%
T-1.0	0,99	0,90	1,13	1,30	1,57	121,9%
T-1.5	0,96	0,81	1,14	1,12	1,48	117,7%

Tab. 20 Analiza wydajności mechanicznej cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach w sytuacji gdy warstwa wierzchnia stanowi podłoże pod warstwę wykończeniową na warstwie rozdzielczej

Seria zaprawy	f_c	f_{ct}	f_b	ΔV	f_h	MPR (%)
R-0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100,0%
S-0.5	0,94	0,85	1,10	1,64	1,59	125,2%
S-1.0	0,84	0,84	0,97	1,06	1,35	109,8%
S-1.5	0,90	0,88	0,94	1,23	0,95	92,0%
A-0.5	0,93	0,92	1,19	1,02	1,18	105,1%
A-1.0	0,89	0,90	1,06	1,08	1,43	116,2%
A-1.5	0,89	0,91	0,93	1,14	1,39	114,0%
T-0.5	0,92	0,77	1,37	1,15	1,23	105,1%
T-1.0	0,99	0,90	1,13	1,30	1,57	126,5%
T-1.5	0,96	0,81	1,14	1,12	1,48	119,7%

Tab. 21 Analiza wydajności mechanicznej cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach w sytuacji gdy warstwa wierzchnia stanowi podłoże pod warstwę wykończeniową na warstwie izolacji termicznej

Seria zaprawy	f_c	f_{ct}	f_b	ΔV	f_h	MPR (%)
R-0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100,0%
S-0.5	0,94	0,85	1,10	1,64	1,59	115,2%
S-1.0	0,84	0,84	0,97	1,06	1,35	103,4%
S-1.5	0,90	0,88	0,94	1,23	0,95	91,0%
A-0.5	0,93	0,92	1,19	1,02	1,18	101,7%
A-1.0	0,89	0,90	1,06	1,08	1,43	109,7%
A-1.5	0,89	0,91	0,93	1,14	1,39	108,3%
T-0.5	0,92	0,77	1,37	1,15	1,23	98,0%
T-1.0	0,99	0,90	1,13	1,30	1,57	117,3%
T-1.5	0,96	0,81	1,14	1,12	1,48	109,9%

7. PODSUMOWANIE, WNIOSKI, UWAGI KOŃCOWE I PROPONOWANE KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

7.1. Podsumowanie

Celem rozprawy była ocena wpływu dodatku wybranych nanocząstek na podstawowe właściwości cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości w podłogach.

W szczególności celem była ocena wpływu dodatku nanocząstek SiO₂, Al₂O₃ i TiO₂ na takie podstawowe właściwości cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach jak:

- właściwości świeżej zaprawy (konsystencja, gęstość objętościowa, czasy wiązania),
- właściwości fizyczne (gęstość objętościowa, porowatość),
- właściwości wytrzymałościowe (wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu),
- właściwości adhezyjne (przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu),
- właściwości funkcjonalne (ścieralność, przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie).

Z kolei celem aplikacyjnym było wyselekcjonowanie na drodze badawczej rodzaju i ilości dodatku tych nanocząstek, dla których zauważalna będzie poprawa wydajności mechanicznej cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości w podłogach z punktu widzenia ich podstawowych właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych i funkcjonalnych.

Zdaniem autora cele rozprawy zostały osiągnięte.

Określono na drodze badawczej wpływ trzech wybranych rodzajów nanocząstek (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃) na podstawowe właściwości cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach. Wpływ ten został wyjaśniony za pomocą przeprowadzonych badań przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej w funkcji grubości warstwy wierzchniej, a także badań struktury próbek wyciętych ze strefy zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem oraz próbek wyciętych ze strefy przypowierzchniowej warstwy wierzchniej.

Ponadto wykonano szereg badań dotyczących właściwości świeżej zaprawy cementowej oraz podstawowych właściwości fizycznych i wytrzymałościowych badanych zapraw.

W rozprawie zasygnalizowane zostało znaczenie aplikacyjne przeprowadzonych badań. W tym celu wyselekcjonowano rodzaj i ilość dodatku tych nanocząstek, dla których zauważalna była poprawa wydajności mechanicznej cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach z punktu widzenia jej podstawowych właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych i funkcjonalnych.

Tab. 22 przedstawia w sposób syntetyczny wkład własny autora rozprawy w uzupełnienie luk w badaniach właściwości cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości z dodatkiem nanocząstek.

Tab. 22. Wkład własny autora rozprawy w uzupełnienie luk istniejących w literaturze w badaniach właściwości cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości z dodatkiem nanocząstek

Badana właściwość	Rodzaj nanocząstki		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂
Właściwości świeżej zaprawy			
Gęstość objętościowa	☑	☑	☑
Czasy wiązania	☑	☑	☑
Konsystencja	+	+	+
Właściwości fizyczne			
Gęstość objętościowa	☑	☑	☑
Porowatość	☑	☑	☑
Właściwości wytrzymałościowe			
Wytrzymałość na ściskanie	+	+	+
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	+	+	+
Właściwości adhezyjne			
Przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu	☑	☑	☑
Właściwości funkcjonalne			
Ścieralność	☑	☑	☑
Przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie	☑	☑	☑
+ właściwość badana w literaturze, ☑ wkład własny autora rozprawy			

7.2. Wnioski

Na podstawie dokonanego rozpoznania literaturowego, przeprowadzonych rozważań, wykonanych badań i krytycznie przeanalizowanych uzyskanych wyników, sformułowano wnioski szczegółowe wskazujące na osiągnięcie celów postawionych w rozprawie.

1. Przeprowadzone badania właściwości świeżych zapraw, użytych do wykonania cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości modyfikowanej dodatkiem wybranych nanocząstek, wykazały, że:

- wraz ze wzrostem zawartości nanocząstek SiO_2 w stosunku do masy cementu pogarsza się konsystencja świeżej zaprawy cementowej. W szczególności dodatek nanocząstek SiO_2 w ilości 1% powoduje znaczne jej pogorszenie. Ponadto wzrost zawartości nanocząstek SiO_2 powoduje skrócenie czasu początku (poza dodatkiem w ilości 0,5%) i czasu końca wiązania. Stwierdzono, że gęstość objętościowa świeżej zaprawy cementowej nie zależy od dodatku różnej zawartości nanocząstek SiO_2 użytych do wykonania zaprawy. Na podstawie uzyskanych rezultatów badań, można domniemać, że graniczną ilością dodatku nanocząstek SiO_2 , z uwagi na wymagania stawiane mieszankom zapraw, wykorzystywanych do wykonywania cementowych warstw wierzchnich podłóg, jest dodatek w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu,
- wraz ze wzrostem zawartości nanocząstek Al_2O_3 w stosunku do masy cementu pogarsza się konsystencja świeżej zaprawy cementowej. Wyjątek stanowi dodatek nanocząstek Al_2O_3 w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu, dla którego konsystencja świeżej zaprawy cementowej jest na nieznacznie niższym poziomie w porównaniu do zaprawy niezawierającej w swoim składzie nanocząstek. Ponadto wzrost zawartości nanocząstek Al_2O_3 w porównaniu do zaprawy niezawierającej w swoim składzie nanocząstek powoduje skrócenie czasu początku wiązania i wydłużenie czasu końca wiązania. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem zawartości nanocząstek Al_2O_3 w stosunku do masy cementu wzrasta gęstość objętościowa świeżej zaprawy, poza dodatkiem w ilości 0,5%, dla którego gęstość objętościowa świeżej zaprawy jest na tym samym poziomie w porównaniu do zaprawy niezawierającej w swoim składzie nanocząstek. Na podstawie uzyskanych rezultatów badań, można domniemać, że graniczną ilością dodatku nanocząstek Al_2O_3 , z uwagi na wymagania stawiane mieszankom zapraw, wykorzystywanych do wykonywania cementowych warstw wierzchnich podłóg, jest dodatek w ilości 1% w stosunku do masy cementu,

-
- wraz ze wzrostem zawartości nanocząstek TiO_2 w stosunku do masy cementu nie pogarsza się konsystencja świeżej zaprawy cementowej. Ponadto wzrost zawartości nanocząstek TiO_2 nie ma wpływu na początek czasu wiązania zaprawy, ale powoduje skrócenie czasu końca jej wiązania. Stwierdzono, że gęstość objętościowa świeżej zaprawy nie zależy od dodatku różnej zawartości nanocząstek TiO_2 użytych do wykonania zaprawy cementowej.

2. Stwierdzono na podstawie badań, że właściwości fizyczne i wytrzymałościowe stwardniałych zapraw, użytych do wykonania cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości modyfikowanej dodatkiem wybranych nanocząstek:

- zależą w niewielkim stopniu od dodatku różnej zawartości nanocząstek SiO_2 użytych do wykonania zaprawy, przy czym dodatek 0,5% nanocząstek SiO_2 zmniejsza porowatość całkowitą w porównaniu do zaprawy niezawierającej w swoim składzie nanocząstek. Z kolei dodatek nanocząstek SiO_2 w każdej ilości użytej w badaniach (0,5%, 1,0% i 1,5%) charakteryzuje się nieznacznie niższą wytrzymałością na ściskanie po 28 dniach dojrzewania zapraw, w porównaniu z zaprawą referencyjną, pozbawioną dodatku nanocząstek,
- zależą w niewielkim stopniu od dodatku różnej zawartości nanocząstek Al_2O_3 użytego do wykonania zaprawy, przy czym dodatek 0,5% nanocząstek Al_2O_3 zmniejsza porowatość całkowitą w porównaniu do zaprawy niezawierającej w swoim składzie nanocząstek. Z kolei dodatek nanocząstek Al_2O_3 w każdej ilości użytej w badaniach (0,5%, 1,0% i 1,5%) charakteryzuje się nieznacznie niższą wytrzymałością na ściskanie po 28 dniach dojrzewania zapraw, w porównaniu z zaprawą referencyjną, pozbawioną dodatku nanocząstek,
- zależą od dodatku różnej zawartości nanocząstek TiO_2 użytych do wykonania zaprawy, przy czym dodatek nanocząstek TiO_2 w składzie zaprawy cementowej warstwy wierzchniej zmniejsza jej porowatość maksymalnie o około 12,5% w porównaniu do zaprawy niezawierającej w swoim składzie nanocząstek. Z kolei dodatek nanocząstek TiO_2 w każdej ilości użytej w badaniach (0,5%, 1,0% i 1,5%) charakteryzuje się nieznacznie niższą wytrzymałością na ściskanie po 28 dniach dojrzewania zapraw, w porównaniu z zaprawą referencyjną, pozbawioną dodatku nanocząstek.

3. Na podstawie badań właściwości adhezyjnych cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości modyfikowanej dodatkiem wybranych nanocząstek od podkładu stwierdzono, że:

- dodatek nanocząstek SiO_2 w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu wpływa pozytywnie na zespolenie zaprawy warstwy wierzchniej do podkładu betonowego. Świadczą o tym rezultaty badań uzyskane przy zastosowaniu metody odrywania, które wykazały, że wartość przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej modyfikowanej dodatkiem nanocząstek SiO_2 w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu od podkładu betonowego jest nieznacznie wyższa w stosunku do przyczepności warstwy wierzchniej niezawierającej w swoim składzie dodatku nanocząstek. Dodatek nanocząstek SiO_2 powoduje przede wszystkim zdecydowane obniżenie wartości współczynnika zmienności uzyskiwanych wartości przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej modyfikowanej dodatkiem nanocząstek SiO_2 w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu od podkładu niepoddanego obróbce powierzchniowej. Potwierdzają to przeprowadzone badania przebiegu prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej c_L w funkcji grubości h warstwy wierzchniej, z których wynika, że w odległości około 1,5 cm od strefy zespolenia cementowej warstwy wierzchniej z podkładem betonowym dodatek nanocząstek SiO_2 wpływa bardzo pozytywnie na prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej c_L powodując jej wzrost,
- dodatek nanocząstek Al_2O_3 w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu wpływa pozytywnie na zespolenie zaprawy warstwy wierzchniej do podkładu betonowego. Świadczą o tym rezultaty badań uzyskane przy zastosowaniu metody odrywania, które wykazały, że wartość przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej modyfikowanej dodatkiem nanocząstek Al_2O_3 w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu od podkładu jest wyższa o około 20% w stosunku do przyczepności warstwy wierzchniej niezawierającej w swoim składzie dodatku nanocząstek. Dodatek nanocząstek Al_2O_3 powoduje również zdecydowane obniżenie wartości współczynnika zmienności uzyskiwanych wartości przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej modyfikowanej dodatkiem nanocząstek Al_2O_3 w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu od podkładu niepoddanego obróbce powierzchniowej. Potwierdzają to przeprowadzone badania przebiegu prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej c_L w funkcji grubości h warstwy wierzchniej, z których wynika, że w odległości około 1,5 cm od zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem betonowym nanocząstek Al_2O_3 wpływa bardzo pozytywnie na prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej c_L powodując

jej wzrost. Badania z wykorzystaniem SEM potwierdziły, że przyczyną poprawy zespolenia jest fakt, że zaprawa z dodatkiem nanocząstek Al_2O_3 w ilości 0,5% masy cementu cechuje się mniejszym udziałem frakcyjnym porów w strefie zespolenia warstw,

- dodatek nanocząstek TiO_2 w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu wpływa bardzo pozytywnie na zespolenie zaprawy warstwy wierzchniej do podkładu betonowego. Świadczą o tym rezultaty badań uzyskane przy zastosowaniu metody odrywania, które wykazały, że wartość przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej modyfikowanej dodatkiem nanocząstek TiO_2 w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu od podkładu betonowego jest znacznie wyższa w stosunku do przyczepności warstwy wierzchniej niezawierającej w swoim składzie dodatku nanocząstek. Dodatek nanocząstek TiO_2 powoduje także zdecydowane obniżenie wartości współczynnika zmienności uzyskiwanych wartości przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu nie poddanego obróbce powierzchniowej. Potwierdzają to przeprowadzone badania przebiegu prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej c_L w funkcji grubości h warstwy wierzchniej, z których wynika, że w odległości około 1,5 cm od zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem betonowym dodatek nanocząstek TiO_2 wpływa bardzo pozytywnie na prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej c_L powodując jej wzrost. Potwierdzają to również przeprowadzone badania z wykorzystaniem SEM które potwierdziły, że przyczyną poprawy zespolenia jest fakt, że zaprawa z dodatkiem nanocząstek TiO_2 w ilości 0,5% masy cementu cechuje się mniejszym udziałem frakcyjnym porów w zakresie od 0,83 do $7,50\mu\text{m}$,
 - dla warstw wierzchnich modyfikowanych dodatkiem każdego rodzaju nanocząstek bez względu na sposób przygotowania powierzchni warstwy podkładowej przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu nie zależy od wytrzymałości na ściskanie f_{cm} ani wytrzymałości na zginanie f_{ct} zaprawy cementowej.
- 4. Na podstawie badań ścieralności cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości modyfikowanej dodatkiem wybranych nanocząstek stwierdzono, że:**
- zaprawa wykonana z dodatkiem nanocząstek SiO_2 w każdej ilości użytej w badaniach (0,5%, 1,0% i 1,5%) charakteryzuje się niższą ścieralnością, w porównaniu z zaprawą referencyjną, pozbawioną dodatku nanocząstek SiO_2 ,

-
- w przypadku zastosowania dodatku nanocząstek Al_2O_3 w ilości 1,0% i 1,5% w stosunku do masy cementu, następuje zmniejszenie ścieralności warstwy wierzchniej po 28 dniach dojrzewania zaprawy w porównaniu do zaprawy referencyjnej,
 - zaprawa wykonana z dodatkiem nanocząstek TiO_2 w każdej ilości użytej w badaniach (0,5%, 1,0% i 1,5%) charakteryzuje się niższą ścieralnością w porównaniu z zaprawą referencyjną, pozbawioną dodatku nanocząstek TiO_2 .

5. Rezultaty badań przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości modyfikowanej dodatkiem wybranych nanocząstek pokazują, że:

- w przypadku zastosowania dodatku nanocząstek SiO_2 w ilości 0,5% i 1,0% w stosunku do masy cementu, następuje wzrost przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie warstwy wierzchniej po 28 dniach dojrzewania zaprawy w porównaniu do zaprawy referencyjnej,
- zaprawa wykonana z dodatkiem nanocząstek Al_2O_3 w każdej ilości użytej w badaniach (0,5%, 1,0% i 1,5%) charakteryzuje się niższą wartością przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie w porównaniu z zaprawą referencyjną, pozbawioną dodatku nanocząstek,
- zaprawa wykonana z dodatkiem nanocząstek TiO_2 w każdej ilości użytej w badaniach (0,5%, 1,0% i 1,5%) charakteryzuje się wyższą przypowierzchniową wytrzymałością na rozciąganie, w porównaniu z zaprawą referencyjną, pozbawioną dodatku nanocząstek.

6. Na podstawie wyników badań (w tym wyników badań strukturalnych z użyciem SEM) ustalono optymalne ilości dodatku badanych nanocząstek z punktu widzenia właściwości funkcjonalnych cementowej warstwy wierzchniej:

- najkorzystniejsze rezultaty, w rozumieniu mniejszej ścieralności i wyższej przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie cementowej warstwy wierzchniej, przynosi przede wszystkim stosowanie dodatku nanocząstek SiO_2 w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu, w stosunku do zaprawy referencyjnej. Potwierdzają to przeprowadzone badania z wykorzystaniem SEM próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy referencyjnej oraz ze strefy przypowierzchniowej zaprawy. Badania te potwierdziły, że przyczyną poprawy ścieralności i przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie cementowej warstwy wierzchniej jest fakt, że zaprawa z dodatkiem nanocząstek SiO_2 w ilości 0,5% masy cementu cechuje

się mniejszym udziałem frakcyjnym porów w zakresie od 0,83 do 7,50 μm . Całkowity udział porów kapilarnych ϕ w matrycy cementowej w strefie przypowierzchniowej cementowej warstwy wierzchniej modyfikowanej dodatkiem 0,5% SiO_2 w zakresie do 25 μm zmniejszył się o około 23% w stosunku do próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy referencyjnej,

- najkorzystniejsze rezultaty, w rozumieniu mniejszej ścieralności i wyższej przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie cementowej warstwy wierzchniej, przynosi przede wszystkim stosowanie dodatku nanocząstek TiO_2 w ilości 1% w stosunku do masy cementu, w stosunku do zaprawy referencyjnej. Z przeprowadzonych badań wynika, że przyczyną poprawy ścieralności i przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie warstwy wierzchniej jest fakt, że zaprawa z dodatkiem nanocząstek TiO_2 w ilości 1% masy cementu cechuje się mniejszą porowatością w stosunku do zaprawy referencyjnej. Analizując warstwy wierzchnie układane na śrutowanym podkładzie betonowym, stwierdzono, że dodatek 0,5% nanocząstek TiO_2 w składzie zaprawy warstwy wierzchniej zmniejsza porowatość w podstrefie zespolenia warstwy wierzchniej o 40% w stosunku do warstwy wierzchniej wykonanej z zaprawy referencyjnej. Może to być uważane za jeden z ważniejszych czynników odpowiadających za wzrost przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu (wzrost o około 37% w stosunku do zaprawy referencyjnej).
- najkorzystniejsze rezultaty, w rozumieniu mniejszej ścieralności i wyższej przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie warstwy wierzchniej, przynosi przede wszystkim stosowanie dodatku nanocząstek Al_2O_3 w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu, w stosunku do zaprawy referencyjnej. Potwierdzają to przeprowadzone badania z wykorzystaniem SEM próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy referencyjnej oraz ze strefy przypowierzchniowej zaprawy z dodatkiem nanocząstek Al_2O_3 w ilości 0,5% w stosunku do masy cementu. Badania te potwierdziły, że przyczyną poprawy ścieralności i przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie warstwy wierzchniej jest fakt, że zaprawa z dodatkiem nanocząstek Al_2O_3 w ilości 0,5% masy cementu cechuje się mniejszym udziałem frakcyjnym porów w zakresie od 0,83 do 10 μm . Całkowity udział porów kapilarnych ϕ w matrycy cementowej w strefie przypowierzchniowej modyfikowanych dodatkiem 0,5% nanocząstek Al_2O_3 w zakresie do 25 μm zmniejszył się o około 39% w stosunku do próbek pobranych ze strefy przypowierzchniowej zaprawy referencyjnej.

7. Przeprowadzone analizy wydajności mechanicznej cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości w podłogach wykazały, że:

- w sytuacji warstwa wierzchnia stanowi warstwę wykończeniową optymalną ilością dodatku jest 0,5 % nanocząstek SiO₂ bez względu na to, czy warstwa wierzchnia jest wykonana związana z podkładem, na warstwie rozdzielczej czy na warstwie izolacji termicznej,
- w sytuacji warstwa wierzchnia stanowi podłoże pod warstwę wykończeniową optymalną ilością dodatku jest 1,0 % nanocząstek TiO₂ bez względu na to, czy warstwa wierzchnia jest wykonana związana z podkładem, na warstwie rozdzielczej czy na warstwie izolacji termicznej.

7.3. Uwagi końcowe

Po analizie wyników wszystkich przeprowadzonych w ramach rozprawy badań należy stwierdzić, że wpływ dodatku nanocząstek SiO₂, Al₂O₃ i TiO₂, a także wpływ ilości dodatku może być różny w zależności od badanych właściwości cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości. Mając to na uwadze wyselekcjonowano na podstawie wniosków przedstawionych w rozdziale 7.2 pozytywne oraz negatywne wpływy dodatku wymienionych wyżej nanocząstek i zestawiono je w Tab. 23.

Tab. 23 Pozytywne i negatywne wpływy zastosowania nanocząstek SiO₂, Al₂O₃ i TiO₂ na właściwości cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości w podłogach

Pozytywne wpływy	Negatywne wpływy
Właściwości świeżej zaprawy	
Wraz ze wzrostem zawartości nanocząstek TiO ₂ w stosunku do masy cementu konsystencja zaprawy nie zmienia się.	Wraz ze wzrostem zawartości nanocząstek SiO ₂ oraz Al ₂ O ₃ w zaprawie w stosunku do masy cementu pogarsza się konsystencja zaprawy.
Właściwości fizyczne	
Zastosowanie nanocząstek Al ₂ O ₃ oraz TiO ₂ pozwala obniżyć porowatość zapraw.	-
Właściwości wytrzymałościowe	
-	Zastosowanie każdej z badanych nanocząstek skutkuje nieznacznym obniżeniem wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zapraw.
Właściwości adhezyjne	
Dodatek 0,5 % nanocząstek TiO ₂ i 0,5 % nanocząstek Al ₂ O ₃ pozytywnie wpływa na przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu.	-
Właściwości funkcjonalne	
Zaprawy z dodatkiem nanocząstek SiO ₂ i TiO ₂ w ilościach od 0,5 do 1,5 % oraz nanocząstek Al ₂ O ₃ w ilościach od 1 do 1,5 % w stosunku do masy cementu charakteryzują się mniejszą ścieralnością. Z kolei zaprawy z dodatkiem nanocząstek TiO ₂ , nanocząstek Al ₂ O ₃ w ilościach od 0,5 do 1,5 %, nanocząstek SiO ₂ w ilościach od 0,5 do 1 % w stosunku do masy cementu charakteryzują się wyższą przypowierzchniową wytrzymałością na rozciąganie.	-

7.4. Proponowane kierunki dalszych badań

Proponowane dalsze kierunki badań mogłyby obejmować między innymi:

- zbadanie wpływu nie stosowanych do tej pory nanocząstek na przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu oraz na właściwości funkcjonalne warstw wierzchnich takich jak ścieralność czy przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie,
- przeprowadzenie badań wpływu sposobu zagęszczania oraz różnych sposobów aplikacji nanocząstek do zaprawy warstwy wierzchniej na jej właściwości funkcjonalne i wytrzymałościowe.

8. LITERATURA

- [1] Abu-Tair, A.; Lavery, D.; Nadjai, A.; Rigden, S.; Ahmed, T. A new method for evaluating the surface roughness of concrete cut for repair or strengthening. *Constr. Build. Mater.* 2000, 14, 171–176.
- [2] Al-Kheetan, M.J.; Rahman, M.M. Integration of Anhydrous Sodium Acetate (ASAc) into Concrete Pavement for Protection against Harmful Impact of Deicing Salt. *JOM* 2019, 11.
- [3] Al-Kheetan, M.J.; Rahman, M.M.; Chamberlain, D.A. A novel approach of introducing crystalline protection material and curing agent in fresh concrete for enhancing hydrophobicity. *Constr. Build. Mater.* 2018, 160, 644–652.
- [4] Almusallam, A.; Khan, F.; Dulaijan, S.; Al-Amoudi, O. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability. *Cem. Concr. Compos.* 2003, 25, 473–481.
- [5] Atiş, C.D. High Volume Fly Ash Abrasion Resistant Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* 2002, 14, 274–277.
- [6] Banthia, N.; Gupta, R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cem. Concr. Res.* 2006, 36, 1263–1267.
- [7] Banthia, N.; Sheng, J. Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites. *Cem. Concr. Compos.* 1996, 18, 251–269.
- [8] Barnat-Hunek, D., Guz, Ł., Łagód, G., & Jarosz-Hadam, M. (2018, August). Impact of roughness on the wettability of mortars with basalt fibres hydrophobised by nanopolymers solution. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2004, No. 1, p. 030004). AIP Publishing.
- [9] Barnat-Hunek, D., Szymańska-Chargot, M., Jarosz-Hadam, M., & Łagód, G. (2019). Effect of cellulose nanofibrils and nanocrystals on physical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 223, 1-11.
- [10] Bayasi, M.Z.; Zeng, J. Composite slab construction utilizing carbon fiber reinforced mortar. *Struct. J.* 1997, 94, 442–446.

-
- [11] Beeldens, A. An environmental friendly solution for air purification and self-cleaning effect: the application of TiO₂ as photocatalyst in concrete. In Proceedings of the Transport Research Arena Europe–TRA, Göteborg, Sweden, 12-15 June 2006; pp. 12–16.
- [12] Behfarnia, K.; Salemi, N. The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Constr. Build. Mater.* 2013, 48, 580–584.
- [13] Bentz D.P., De la Varga I., Munoz J.F., Spragg R.P., Graybeal B.A., Hussey D.S., Jacobson D.L., Jones S.Z., LaManna J.M., Influence of substrate moisture state and roughness on interface microstructure and bond strength: Slant shear vs. pull-off testing, *Cement and Concrete Composites*, vol. 87, s. 63-72 (2018)
- [14] Beushausen, H.; Bester, N. The influence of curing on restrained shrinkage cracking of bonded concrete overlays. *Cem. Concr. Res.* 2016, 87, 87–96.
- [15] Binici H. Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. *Construction and Building Materials* 2007, 21(6), 1191–1197
- [16] Błaszczynski, T.; Jasiczak, J.; Ksit, B.; Siewczyńska, M. Aspects of bond layer role in concrete repairs. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2006, 6, 75–87.
- [17] Branco, F.A.B.; Silva, V.D.; Júlio, E.N.B.S. Concrete-to-concrete bond strength: influence of an epoxy-based bonding agent on a roughened substrate surface. *Mag. Concr. Res.* 2005, 57, 463–468.
- [18] Canbaz, M.; Topçu, I.B.; Ateşin, Ö. Effect of admixture ratio and aggregate type on self-leveling screed properties. *Constr. Build. Mater.* 2016, 116, 321–325.
- [19] Chajec, A.; Krzywiński, K.; Sadowski, Ł.; Ostrowski, K. The influence of polypropylene fibres on the properties of fresh and hardened concrete. *Czas. Tech.* 2019, 5, 71–82.
- [20] Chin, M.S.; Mansur, M.A.; Wee, T.H. Effects of shape, size, and casting direction of specimens on stress-strain curves of high-strength concrete. *Mater. J.* 1997, 94, 209–219.
- [21] Choudalakis, G.; Gotsis, A. Permeability of polymer/clay nanocomposites: A review. *Eur. Polym. J.* 2009, 45, 967–984.

-
- [22] Christodoulou, C.; Goodier, C.; Austin, S.; Webb, J.; Glass, G.; Goodier, C. Long-term performance of surface impregnation of reinforced concrete structures with silane. *Constr. Build. Mater.* 2013, 48, 708–716.
- [23] Courard, L. Adhesion of repair systems to concrete: influence of interfacial topography and transport phenomena. *Mag. Concr. Res.* 2005, 57, 273–282.
- [24] Courard, L.; Piotrowski, T.; Garbacz, A. Near-to-surface properties affecting bond strength in concrete repair. *Cem. Concr. Compos.* 2014, 46, 73–80.
- [25] Czarnecki Lech "Nanotechnologia w budownictwie." *Przegląd budowlany*, nr 1, 2011
- [26] Czarnecki, L.; Van Gemert, D. Scientific basis and rules of thumb in civil engineering: conflict or harmony? *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.* 2016, 64, 665–673.
- [27] Czarnecki, S. Ocena zespolenia betonowej warstwy naprawczej z warstwą podkładową z wykorzystaniem metod nieniszczących i sztucznej inteligencji; Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2019.
- [28] Delucchi, M.; Barbucci, A.; Cerisola, G. Study of the physico-chemical properties of organic coatings for concrete degradation control. *Constr. Build. Mater.* 1997, 11, 365–371.
- [29] Diamanti, M.V.; Brenna, A.; Bolzoni, F.M.; Berra, M.; Pastore, T.; Ormellese, M. Effect of polymer modified cementitious coatings on water and chloride permeability in concrete. *Constr. Build. Mater.* 2013, 49, 720–728.
- [30] Diamanti, M.V.; Paolini, R.; Rossini, M.; Aslan, A.B.; Zinzi, M.; Poli, T.; Pedefferri, M.P. Long term self-cleaning and photocatalytic performance of anatase added mortars exposed to the urban environment. *Constr. Build. Mater.* 2015, 96, 270–278.
- [31] DIN 18560-7 Floor screeds - Part 7: Heavy-duty screeds (industrial screeds)
- [32] Dybeł, P.; Furtak, K. Assessment of the Casting Position Factor in Reinforced Concrete Elements in View Of Experimental Studies. *Arch. Civ. Eng.* 2014, 60, 209–222.

-
- [33] El-Rakib, T.M.; Farahat, A.M.; El-Degwy, W.M.; Shaheen, H.H. Shear transfer parameters at the interface between old and new concrete. In Proceedings of the International Conference on Performance of Construction Materials in the New Millennium, Cairo, Egypt, 18–20 February 2003.
- [34] EN 13892-2. Methods of test for screed materials—Part 2: determination of flexural and compressive strength; 2002.
- [35] EN 13892-3. Methods of Test for Screed Materials. Determination of Wear Resistance-Böhme; British Standards Institution: London, UK, 2014.
- [36] EN 1504-10. Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures—Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity; Part 10: Site Application of Products and Systems and Quality Control of the Works; British Standards Institution: London, UK, 2017.
- [37] EN 1542 – Products and systems for the protection and repair of concrete structures- Test methods-Measurement of bond strength by pull-off.
- [38] EN 196-1 196-1. Methods of testing cement.
- [39] Felekoğlu, B.; Türkel, S.; Altuntaş, Y. Effects of steel fiber reinforcement on surface wear resistance of self-compacting repair mortars. *Cem. Concr. Compos.* 2007, 29, 391–396.
- [40] Fic, S., & Barnat-Hunek, D. (2014). The effectiveness of hydrophobisation of porous building materials by using the polymers and nanopolymers solutions. *Int. J. Mater. Sci. Eng*, 2(2), 93.
- [41] Fic, S., Szewczak, A., Barnat-Hunek, D., & Łagód, G. (2017). Processes of fatigue destruction in nanopolymer-hydrophobised ceramic bricks. *Materials*, 10(1), 44.
- [42] Franck, A.; De Belie, N. Concrete Floor–Bovine Claw Contact Pressures Related to Floor Roughness and Deformation of the Claw. *J. Dairy Sci.* 2006, 89, 2952–2964.
- [43] Franzoni, E.; Varum, H.; Natali, M.E.; Bignozzi, M.C.; Melo, J.; Rocha, L.; Pereira, E. Improvement of historic reinforced concrete/mortars by impregnation and electrochemical methods. *Cem. Concr. Compos.* 2014, 49, 50–58.

-
- [44] G. Słowik, Podstawy mikroskopii elektronowej i jej wybrane zastosowania w charakterystyce katalizatorów nośnikowych; Rozdział 12 w monografii pt.: Adsorbenty i katalizatory. Wybrane technologie a środowisko. Pod redakcją Janusza Ryczkowskiego, Uniwersytet Rzeszowski, str. 219-243, ISBN 978-83-931292-8-7
- [45] Garbacz, A.; Courard, L.; Bissonnette, B. A surface engineering approach applicable to concrete repair engineering. *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.* 2013, 61, 73–84.
- [46] Garbacz, A.; Courard, L.; Kostana, K. Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems. *Mater. Charact.* 2006, 56, 281–289.
- [47] Garbacz, A.; Górka, M.; Courard, L. Effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems. *Mag. Concr. Res.* 2005, 57, 49–60.
- [48] Garber, G. *Design and Construction of Concrete Floors*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2006.
- [49] García, A.; Castro-Fresno, D.; Polanco, J.A.; Thomas, C. Abrasive wear evolution in concrete pavements. *Road Mater. Pavement Des.* 2012, 13, 534–548.
- [50] García, A.; Fresno, D.C.; Polanco, J.A. Effect of dry-shaking treatment on concrete pavement properties. *Constr. Build. Mater.* 2008, 22, 2202–2211.
- [51] Gencel, O.; Gok, M.S.; Brostow, W. Effect of metallic aggregate and cement content on abrasion resistance behaviour of concrete. *Mater. Res. Innov.* 2011, 15, 116–123.
- [52] Gengying, L. A new way to increase the long- term bond strength of new-to- old concrete by the use of fly ash. *Cem. Concr. Res.* 2003, 33, 799–806.
- [53] Ghazy, A.; Bassuoni, M.T. Shrinkage of nano-modified fly ash concrete as a repair material. *ACI Mater. J.* 2017, 114, 877–888.
- [54] Golewski, G. L. Energy savings associated with the use of fly ash and nanoadditives in the cement composition. *Energies*, 2020, 13 (9), 2184.

-
- [55] Grdic, Z.J.; Curcic, G.A.T.; Ristic, N.S.; Despotovic, I.M. Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers. *Constr. Build. Mater.* 2012, 27, 305–312.
- [56] Hajduk P., Projektowanie i ocena techniczna betonowych podłóg przemysłowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2018
- [57] Haruehansapong, S., Pulngern, T., Chucheeepsakul, S. Effect of nanosilica particle size on the water permeability, abrasion resistance, drying shrinkage, and repair work properties of cement mortar containing nano-SiO₂. *Advances in Materials Science and Engineering 2017 (2017)*
- [58] Hassan, M.M.; Dylla, H.; Mohammad, L.N.; Rupnow, T. Evaluation of the durability of titanium dioxide photocatalyst coating for concrete pavement. *Constr. Build. Mater.* 2010, 24, 1456–1461.
- [59] He, Z.; Chen, X.; Cai, X. Influence and mechanism of micro/nano-mineral admixtures on the abrasion resistance of concrete. *Constr. Build. Mater.* 2019, 197, 91–98.
- [60] Hoła, J.; Sadowski, Ł.; Hoła, A. The effect of failure to comply with technological and technical requirements on the condition of newly built cement mortar floors. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.* 2019, 233, 268–275.
- [61] Horszczaruk, E. "Odporność na ścieranie betonowych posadzek przemysłowych." *Materiały Budowlane (2014)*
- [62] Jamroży, Z. *Beton i jego technologie*; Państwowe Wydawnictwo Naukowe: Warszawa/Kraków, Poland, 2005.
- [63] Jasiczak, J.; Szymański, P. Technologia i Wykonanie Posadzek Betonowych w Aspekcie Skurczu i Pielęgnacji Betonu. *Materiały Budowlane* 2006, 9, 16–19.
- [64] K. Sadłowski, D. Urbanowicz, M. Warzocha, Podkłady podłogowe wymagania, projektowanie, wykonawstwo, *Materiały Budowlane*, nr11/2015
- [65] Kaszyńska, M. Early age properties of high-strength/high-performance concrete. *Cement and concrete composites*, 24(2), 2002, 253-261.

-
- [66] Kaszynska, M.; Olczyk N. The influence of TiO₂ nanoparticles on the properties of self-cleaning cement mortar. *Int. Multidiscip. Sci. GeoConference SGEM*, 2018, 333-341.
- [67] Kelsall, Robert W., Ian W. Hamley, Mark Geoghegan, and Krzysztof Jan Kurzydłowski, eds. *Nanotechnologie*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2008.
- [68] Khatib, J.; Mangat, P.; Khatib, J. Porosity of cement paste cured at 45 °C as a function of location relative to casting position. *Cem. Concr. Compos.* 2003, 25, 97–108.
- [69] Kılıç, A.; Atış, C.; Teymen, A.; Karahan, O.; Özcan, F.; Bilim, C.; Ozdemir, M.; Kilic, A. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2008, 30, 290–296.
- [70] Kim, S.B.; Yi, N.H.; Kim, H.Y.; Kim, J.-H.J.; Song, Y.-C. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2010, 32, 232–240.
- [71] Kosmatka, S.H.; Kerkhoff, B.; Panarese, W.C. *Design and Control of Concrete Mixtures*; Portland Cement Association: Skokie, IL, USA, 2002; Volume 5420.
- [72] Krakowiak, K.J.; Thomas, J.J.; James, S.; Abuhaikal, M.; Ulm, F.-J. Development of silica-enriched cement-based materials with improved aging resistance for application in high-temperature environments. *Cem. Concr. Res.* 2018, 105, 91–110.
- [73] Król, M. Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych. *Przegląd Budowlany*, 2009, 80, 30-36.
- [74] Krzywiński, K.; Chajec, A.; Sadowski, Ł. The effect of the concentration of steel fibres on the properties of industrial floors. *Czas. Tech.* 2019, 4, 115–132.
- [75] Krzywiński, K.; Sadowski, Ł. The Effect of Texturing of the Surface of Concrete Substrate on the Pull-Off Strength of Epoxy Resin Coating. *Coatings* 2019, 9, 143.
- [76] Krzywiński, K.; Sadowski, Ł.; Łaszczak, M. The effect of the type of substrate and its surface treatment on the pull-off strength of gypsum plasters. *J. Adhes.* 2019, doi:10.1080/00218464.2019.1653762.

-
- [77] Krzywiński, K.; Sadowski, Ł.; Szymanowski, J.; Żak, A.; Piechówka-Mielnik, M. Attempts to Improve the Subsurface Properties of Horizontally-Formed Cementitious Composites Using Tin(II) Fluoride Nanoparticles. *Coatings* 2020, 10, 83.
- [78] Kurda, R., de Brito, J., & Silvestre, J. (2018). Combined economic and mechanical performance optimization of recycled aggregate concrete with high volume of fly ash. *Applied Sciences*, 8(7), 1189.
- [79] L. Brunarski, L. Runkiewicz (1983): Podstawy i przykłady stosowania metod nieniszczących w badaniach konstrukcji z betonu.
- [80] Lameiras, R.; Barros, J.A.; Azenha, M. Influence of casting condition on the anisotropy of the fracture properties of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC). *Cem. Concr. Compos.* 2015, 59, 60–76.
- [81] Li, B.; Lam, E.S.S. Influence of interfacial characteristics on the shear bond behaviour between concrete and ferrocement. *Constr. Build. Mater.* 2018, 176, 462–469.
- [82] Liu, Jintao, Qinghua Li, and Shilang Xu. "Influence of nanoparticles on fluidity and mechanical properties of cement mortar." *Construction and Building Materials* 101 (2015): 892-901
- [83] Liu, Y.-W. Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume. *Constr. Build. Mater.* 2007, 21, 972–977.
- [84] Mathia, T.G.; Pawlus, P.; Wieczorowski, M. Recent trends in surface metrology. *Wear* 2011, 271, 494–508.
- [85] Mirmoghtadaei, R.; Mohammadi, M.; Samani, N.A.; Mousavi, S. The impact of surface preparation on the bond strength of repaired concrete by metakaolin containing concrete. *Constr. Build. Mater.* 2015, 80, 76–83.
- [86] Misra, A.; Cleland, D.J.; Basheer, P.A.M. Effect of different substrate and overlay concretes on bond strength and interfacial permeability. *Concr. Sci. Eng.* 2001, 3, 73–77.
- [87] Mohammadi, M.; Moghtadaei, R.M.; Samani, N.A. Influence of silica fume and metakaolin with two different types of interfacial adhesives on the bond strength of repaired concrete. *Constr. Build. Mater.* 2014, 51, 141–150.
-

-
- [88] Mohammed, A.; Sanjayan, J.G.; Duan, W.H.; Nazari, A. Graphene Oxide Impact on Hardened Cement Expressed in Enhanced Freeze–Thaw Resistance. *J. Mater. Civ. Eng.* 2016, 28, 4016072.
- [89] Momayez, A.; Ehsani, M.; Ramezaniapour, A.; Rajaie, H. Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials. *Cem. Concr. Res.* 2005, 35, 748–757.
- [90] Moon, H.Y.; Shin, D.G.; Choi, D.S. Evaluation of the durability of mortar and concrete applied with inorganic coating material and surface treatment system. *Constr. Build. Mater.* 2007, 21, 362–369.
- [91] Mu, B.; Li, Z.; Peng, J. Short fiber-reinforced cementitious extruded plates with high percentage of slag and different fibers. *Cem. Concr. Res.* 2000, 30, 1277–1282.
- [92] Neville Adam, M. *Properties of Concrete*; Longman: London, UK, 1995; Volume 4.
- [93] Niewiadomski P, Stefaniuk D, Hoła J. Microstructural Analysis of Self-compacting Concrete Modified with the Addition of Nanoparticles. *Procedia Engineering* 2017;172:776-83
- [94] Niewiadomski, P. Wpływ dodatku wybranych nanocząstek na właściwości betonu samozagęszczającego się; Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2019.
- [95] Niewiadomski, P., Hoła, J., & Ćwirzeń, A. (2018). Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(3), 877-886.
- [96] Niewiadomski, P.; Stefaniuk, D. The Effect of Adding Selected Nanoparticles on the Mechanical Properties of the Cement Matrix of Self-Compacting Concrete. *Appl. Mech. Mater.* 2015, 797, 158–165.
- [97] Onuaguluchi, O.; Eren, Ö. Recycling of copper tailings as an additive in cement mortars. *Constr. Build. Mater.* 2012, 37, 723–727.
- [98] Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T. C., & Li, N. (2017). A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms. *Construction and Building Materials*, 132, 578-590.

-
- [99] Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T. C., & Li, N. (2017). A review on surface treatment for concrete—Part 2: Performance. *Construction and Building Materials*, 133, 81-90.
- [100] Pan, X.; Shi, Z.; Shi, C.; Ling, T.-C.; Li, N. A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms. *Constr. Build. Mater.* 2017, 132, 578–590.
- [101] Parghi, A.; Alam, M.S.; Parghi, P.A. Effects of curing regimes on the mechanical properties and durability of polymer-modified mortars—An experimental investigation. *J. Sustain. Cem. Mater.* 2016, 5, 24.
- [102] Pigino, B.; Leemann, A.; Franzoni, E.; Lura, P. Ethyl silicate for surface treatment of concrete—Part II: Characteristics and performance. *Cem. Concr. Compos.* 2012, 34, 313–321.
- [103] PN-EN 1015-6:2000. Metody badań zapraw do murów -- Określenie gęstości objętościowej świeżej zaprawy
- [104] PN-EN 13813:2003 - Podkłady podłogowe oraz materiały do ich wykonania - Materiały - Właściwości i wymagania
- [105] Popek, M.; Sadowski, Ł.; Szymanowski, J. Abrasion Resistance of Concrete Containing Selected Mineral Powders. *Procedia Eng.* 2016, 153, 617–622.
- [106] Qin, J.; Qian, J.; You, C.; Fan, Y.; Li, Z.; Wang, H. Bond behavior and interfacial micro-characteristics of magnesium phosphate cement onto old concrete substrate. *Constr. Build. Mater.* 2018, 167, 166–176.
- [107] Różański, A., Rajczakowska, M., & Serwicki, A. (2015). The influence of microstructure geometry on the scale effect in mechanical behaviour of heterogeneous materials. *Science and Engineering of Composite Materials*.
- [108] Sadłowski, K., D. Urbanowicz, and M. Warzocha. "Podkłady podłogowe: wymagania, projektowanie, wykonawstwo." *Materiały Budowlane* 11 (2015): 81-84
- [109] Sadowski, Ł. *Adhesion in Layered Cement Composites*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland ,2019; ISBN 978-3-030-03782-6.

-
- [110] Sadowski, Ł. Multi-Scale Evaluation of the Interphase Zone between the Overlay and Concrete Substrate: Methods and Descriptors. *Appl. Sci.* 2017, 7, 893, doi:10.3390/app7090893
- [111] Sadowski, Ł. Nieniszcząca ocean zespolenia warstw betonowych w podłogach z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych; Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2013.
- [112] Sadowski, Ł. Towards the utilization of waste glass powder in sustainable cement based overlays. In *MATEC Web of Conferences*; EDP Sciences, 2018; Volume 163, p. 03001.
- [113] Sadowski, Ł.; Czarnecki, S.; Hoła, J. Evaluation of the height 3D roughness parameters of concrete substrate and the adhesion to epoxy resin. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2016, 67, 3–13.
- [114] Sadowski, Ł.; Hoła, A.; Hoła, J. Methodology for Controlling the Technological Process of Executing Floors Made of Cement-Based Materials. *Materials* 2020, 13 (4): 948.
- [115] Sadowski, Ł.; Hoła, J. Wpływ wybranych kwarcowych dodatków mineralnych modyfikujących beton warstwy wierzchniej na jego zespolenie z podkładem betonowym. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym* 2017, 1, 21–26.
- [116] Sadowski, Ł.; Hoła, J.; Czarnecki, L.; Mathia, T. G. New paradigm in the metrology of concrete surface morphology: Methods, parameters and applications. *Measurement* 2021, 169, 108497.
- [117] Sadowski, Ł.; Krzywiński, K.; Michoń, M. The influence of texturing of the surface of concrete substrate on its adhesion to cement mortar overlay. *J. Adhes.* 2019, doi:10.1080/00218464.2019.1654383.
- [118] Sadowski, Ł.; Piechówka-Mielnik, M.; Widziszowski, T.; Gardynik, A.; Mackiewicz, S. Hybrid ultrasonic-neural prediction of the compressive strength of environmentally friendly concrete screeds with high volume of waste quartz mineral dust. *J. Clean. Prod.* 2019, 212, 727–740.

-
- [119] Sadowski, Ł.; Stefaniuk, D. Microstructural Evolution within the Interphase between Hardening Overlay and Existing Concrete Substrates. *Appl. Sci.* 2017, 7, 123.
- [120] Sadowski, Ł.; Stefaniuk, D.; Hoła, J. The effect of the porosity within the interfacial zone between layers on pull-off adhesion. *Constr. Build. Mater.* 2017, 152, 887–897.
- [121] Sadowski, Ł.; Żak, A.; Hoła, J. Multi-sensor evaluation of the concrete within the interlayer bond with regard to pull-off adhesion. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2018, 18, 573–582.
- [122] Santos, D.S.; Santos, P.M.; Dias-Da-Costa, D. Effect of surface preparation and bonding agent on the concrete-to-concrete interface strength. *Constr. Build. Mater.* 2012, 37, 102–110.
- [123] Santos, P.M.; Júlio, E.N.; Silva, V.D. Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface. *Constr. Build. Mater.* 2007, 21, 1688–1695.
- [124] Santos, P.M.D.; Júlio, E.N.B.S. Comparison of Methods for Texture Assessment of Concrete Surfaces. *ACI Mater. J.* 2010, 107, 433–440.
- [125] Scarfato, P.; Maio, L.D.; Fariello, M.L.; Russo, P.; Incarnato, L. Preparation and evaluation of polymer/clay nanocomposite surface treatments for concrete durability enhancement. *Cem. Concr. Compos.* 2012, 34, 297–305.
- [126] Schulze, J. Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars. *Cem. Concr. Res.* 1999, 29, 909–915.
- [127] Sebök, T.; Stráněl, O. Wear resistance of polymer-impregnated mortars and concrete. *Cem. Concr. Res.* 2004, 34, 1853–1858.
- [128] Siddique, R. Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the abrasion resistance of concrete. *Cem. Concr. Res.* 2003, 33, 1877–1881.
- [129] Siewczyńska, M. Wpływ wybranych parametrów betonu na przyczepność powłok ochronnych; Rozprawa doktorska; Politechnika Poznańska, Poznań, 2008.
- [130] Siewczyńska, M.; Jasiczak, J. Wpływ wybranych parametrów betonu na przyczepność powłok naprawczych. *Materiały Budowlane* 2009, 2, 10–11.
-

-
- [131] Sikora, P., Cendrowski, K., Markowska-Szczupak, A., Horszczaruk, E., & Mijowska, E. The effects of silica/titania nanocomposite on the mechanical and bactericidal properties of cement mortars. *Construction and Building Materials* 2017, 150, 738-746.
- [132] Silfwerbrand, J.; Beushausen, H. Bonded concrete overlays—Bond strength issues. In *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*; Alexander, M., Beushausen, H.-D., Dehn, F., Moyo, P., Eds.; Taylor Francis Group: London, UK, 2006
- [133] Silfwerbrand, J.; Beushausen, H.; Courard, L. Bonded Cement-Based Material Overlays for the Repair, the Lining or the Strengthening of Slabs or Pavements. In *RILEM State of the Art Reports*; Bissonnette, B., Courard, L., Fowler, D., Granju, J.L., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2011; Volume 3.
- [134] Silva, C.V.; Zorzi, J.E.; Cruz, R.C.; Molin, D.C.D. Experimental evidence that micro and macrostructural surface properties markedly influence on abrasion resistance of concretes. *Wear* 2019, 422, 191–200.
- [135] Silva, J.J.; Ismael, R.; Carmo, R.N.F.; Lourenço, C.; Soldado, E.; Costa, H.; Júlio, E. Influence of nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ additions on the shear strength and the bending moment capacity of RC beams. *Constr. Build. Mater.* 2016, 123, 35–46.
- [136] Śliwiński, J. Podstawowe właściwości betonu i jego trwałość. *Cement Wapno Beton* 2009, 5, 245–254.
- [137] Słonina, Sławomir. "Ścieralność betonowych posadzek przemysłowych utwardzanych powierzchniowo." *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury* (2017)
- [138] Sobolev, Konstantin, and Miguel Ferrada Gutiérrez. "How nanotechnology can change the concrete world." *American Ceramic Society Bulletin* 84.10 (2005): 14.
- [139] Song, P.; Hwang, S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 2004, 18, 669–673.
- [140] Stawiski B.; Kania T. Examining the Distribution of Strength across the Thickness of Reinforced Concrete Elements Subject to Sulphate Corrosion Using the Ultrasonic Method. *Materials* 2019, 12(16), 2519
- [141] Stawiski, B. The heterogeneity of mechanical properties of concrete in formed constructions horizontally. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2012, 12, 90–94.
-

-
- [142] Stawiski, B.; Radzik, Ł. Need to Identify Parameters of Concrete in the Weakest Zone of the Industrial Floor. *IOP Conf. Series Mater. Sci. Eng.* 2017, 245, 22063.
- [143] Stefaniuk, D.; Niewiadomski, P; Musiał M; Łydźba, D. Elastic properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles: Multiscale approach. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 19 (4), 1150-1162
- [144] Sun, Z.; Xu, Q. Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. *Mater. Sci. Eng. A* 2009, 527, 198–204.
- [145] Szostak, B. A., Golewski, G. L. Analiza wytrzymałości na ściskanie betonów z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych oraz nanodomieszki CSH. *Materiały Budowlane*, 2016, 11, 48-49.
- [146] Szymanowski J., Comparative analysis of the effect of modifying overlay material with selected nanoparticles on its adhesion to the substrate in concrete floors. W: *Advanced Joining Processes / Lucas F. M. da Silva, Paulo A. F. Martins, Mohamad S. El-Zein (ed.)*. Singapore : Springer, cop. 2020. s. 131-151.
- [147] Szymanowski J., Evaluation of the Adhesion between Overlays and Substrates in Concrete Floors: Literature Survey, Recent Non-Destructive and Semi-Destructive Testing Methods and Research Gaps, *Buildings* 9.9 (2019), 203.
- [148] Szymanowski J., Sadowski Ł., Functional and adhesive properties of cement-based overlays modified with amorphous silica nanospheres, *The Journal of Adhesion* (2019), 1-22
- [149] Szymanowski J., Sadowski Ł., The development of nanoalumina-based cement mortars for overlay applications in concrete floors, *Materials*
- [150] Szymanowski J., Sadowski Ł., The influence of the addition of tetragonal crystalline titanium oxide nanoparticles on adhesive and functional properties of layered cementitious composites, *Composite Structures*
- [151] Tayeh, B.A.; Bakar, B.A.; Johari, M.M.; Voo, Y.L. Evaluation of bond strength between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete as a repair material. *Procedia Eng.* 2013, 54, 554–563.
- [152] Tayeh, B.B.; Bakar, B.H.A.; Johari, M.A.M.; Ratnam, M.M. The relationship between substrate roughness parameters and bond strength of ultra high-performance fiber concrete. *J. Adhes. Sci. Technol.* 2013, 27, 21.
-

-
- [153] Tejchman, J.; Małaśkiewicz, A. *Industrial Floors*; Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej: Gdańsk, Poland, 2006; Volume 181, ISBN 83-7348-166-4.
- [154] Wong HS. Head, M. K., & Buenfeld, N. R. Pore segmentation of cement-based materials from backscattered electron images. *Cem Concr Res.* 2006; 36, 6.
- [155] Xiong, G.; Liu, J.; Li, G.; Xie, H. A way for improving interfacial transition zone between concrete substrate and repair materials. *Cem. Concr. Res.* 2002, 32, 1877–1881.
- [156] Xiong, G.; Luo, B.; Wu, X.; Li, G.; Chen, L. Influence of silane coupling agent on quality of interfacial transition zone between concrete substrate and repair materials. *Cem. Concr. Compos.* 2006, 28, 97–101.
- [157] Żenczykowski W.: *Budownictwo ogólne, tom 1: materiały i wyroby budowlane*, Arkady, Warszawa (1992).
- [158] Zhang, P., Han, S., Golewski, G. L., Wang, X. Nanoparticle-reinforced building materials with applications in civil engineering, *Adv. Mech. Eng.*, 2020, 12 (10), 1-4.
- [159] Zybura, A.; Jaśniok, M.; Jaśniok, T. *Diagnostics of Concrete Structures*; Wydawnictwo Naukowe PWN: Warszawa, Poland, 2017..

Streszczenie

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy oceny wpływu dodatku nanocząstek tlenku krzemu (SiO_2), tlenku aluminium (Al_2O_3) i tlenku tytanu (TiO_2) na podstawowe właściwości cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach.

W rozprawie określono, na podstawie badań, wpływ dodatku nanocząstek SiO_2 , Al_2O_3 i TiO_2 i różnej ich ilości na właściwości świeżej zaprawy na podstawie badań konsystencji, gęstości objętościowej i czasów wiązania.

Poznano również, na drodze badawczej, wpływ każdego rodzaju zastosowanych nanocząstek i różnej ich ilości na właściwości fizyczne stwardniałych zapraw takie jak gęstość objętościowa i porowatość. W rozprawie wykonano dla tych samych zapraw badania właściwości wytrzymałościowych i określono wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu zapraw.

Przeanalizowano i wyjaśniono jaki jest wpływ dodatku nanocząstek SiO_2 , Al_2O_3 i TiO_2 i różnej ich ilości na właściwości adhezyjne cementowych warstw wierzchnich wysokiej wytrzymałości na podstawie badań przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu oraz jaki jest wpływ dodatku tych nanocząstek na właściwości funkcjonalne zapraw takie jak ścieralność i przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie. Wpływ ten został wyjaśniony za pomocą przeprowadzonych badań przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej w funkcji grubości warstwy wierzchniej, a także badań struktury próbek wyciętych ze strefy zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem oraz próbek wyciętych ze strefy przypowierzchniowej warstwy wierzchniej.

W rozprawie zasygnalizowano także znaczenie aplikacyjne przeprowadzonych badań. Na podstawie przeprowadzonej wielowariantowej analizy wydajności mechanicznej wyselekcjonowano na drodze badawczej rodzaj i ilości dodatku tych nanocząstek, dla których zauważalna była poprawa wydajności mechanicznej cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach z punktu widzenia jej podstawowych właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych i funkcjonalnych.

Summary

This doctoral dissertation concerns the assessment of the effect of the addition of silicon oxide (SiO_2), aluminum oxide (Al_2O_3) and titanium oxide (TiO_2) nanoparticles on the principal properties of high-strength cementitious overlays in floors.

The dissertation determined, based on the research, the effect of the addition of nanoparticles SiO_2 , Al_2O_3 and TiO_2 and their various amounts on the properties of the fresh mortar on the basis of tests of consistency, bulk density and setting times.

The research has also revealed the effect of each type of nanoparticle and their different amount on the physical properties of hardened mortars, such as bulk density and porosity. In the dissertation, tests of mechanical strength were carried out for the same mortars and the compressive strength and tensile strength the mortars were determined.

The influence of the addition of nanoparticles SiO_2 , Al_2O_3 and TiO_2 and their various amounts on the adhesive properties of high-strength cementitious overlays was analyzed and explained based on the pull-off adhesion tests, and what is the effect of the addition of these nanoparticles on the functional properties of mortars, such as abrasion resistance and near-surface pull-off strength. This influence was explained by the conducted tests of the longitudinal ultrasonic wave as a function of the thickness of the overlay, as well as tests of the structure of samples cut from the area of the interphase between the overlay and the substrate and samples cut from the near-surface zone of the overlay.

The dissertation also indicated the applicability of the research. On the basis of the multivariate analysis of mechanical performance, the type and amount of the addition of these nanoparticles, for which the improvement of the mechanical performance of the high-strength cementitious overlay in floors was noticeable in terms of its principal strength, adhesive and functional properties, was selected.