

dr inż. Jacek Szymanowski¹⁾
ORCID: 0000-0002-8154-8726

Wpływ modyfikacji zaprawy cementowej wybranymi nanocząstkami na ścieralność i przypowierzchniową wytrzymałość na rozciąganie

Effect of modification of cement mortar with selected nanoparticles on abrasiveness and subsurface tensile strength

DOI: 10.15199/33.2024.06.02

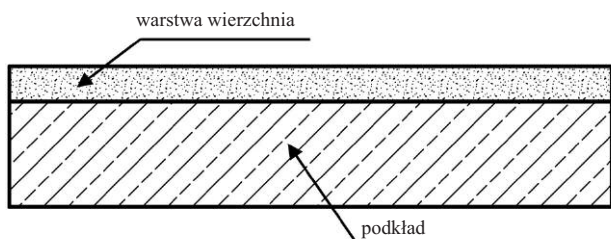
Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę wpływu wybranych nanocząstek na określone parametry zaprawy warstwy wierzchniej podłogi betonowej. Badania zostały przeprowadzone na 13 seriach zapraw różniących się rodzajem dodatku oraz jego ilością. Wykazano, że dodatek każdej z badanych nanocząstek wpływa korzystnie na takie właściwości warstwy wierzchniej, jak ścieralność i przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie oraz określono optymalną ilość dodatku w przypadku każdego rodzaju nanocząstek.

Słowa kluczowe: warstwy wierzchnie; nanocząstki; podłogi betonowe; ścieralność; przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie.

Abstract. The article presents an analysis of the impact of selected nanoparticles on selected mortar overlay parameters in concrete floors. The tests were carried out for 13 series of mortars differing in the type of additive and its amount. It was shown that the addition of each of the tested nanoparticles had a positive effect on the overlay properties, such as abrasion and subsurface tensile strength, and the optimal amount of the additive for each type of nanoparticles was indicated.

Keywords: overlays; nanoparticles; concrete floors; abrasion resistance; subsurface tensile strength.

Podłogi betonowe są powszechnie stosowane w budownictwie mieszkaniowym, użyteczności publicznej oraz przemysłowym. Najczęściej stanowią układy warstwowe, tzn. składają się z co najmniej dwóch warstw, tj. warstwy wierzchniej i podkładu (rysunek 1). Warstwy wierzchnie mogą być wykonane jako: cementowe; magnezjowe; anhydrytowe; asfaltowe oraz z żywicy syntetycznych. Optymalny dobór materiału zależy od warunków, w jakich będzie użytkowana warstwa wierzchnia oraz aspektów finansowych. Najpowszechniejsze są warstwy wierzchnie cementowe lub z kompozytów cementowych składających się z matrycy cementowej, piasku oraz dodatków. Ze względu na trwałość i wymagania dotyczące warstwy wierzchniej, już na etapie projektowania zakłada się jej właściwości [1, 2]. W przypadku świeżej zaprawy określa się konsystencję, gę-



Rys. 1. Przekrój przez typową podłogę betonową
Fig. 1. Cross-section of typical concrete floor

stość objętościową, czas wiązania, natomiast stwardniałej zaprawy m.in.: wytrzymałość na ściskanie; wytrzymałość na rozciąganie; przyczepność przy odrywaniu metodą odrywania pull-off; ścieralność oraz przypowierzchniową wytrzymałość na rozciąganie [3]. W celu poprawy przyczepności przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu stosuje się: obróbkę mechaniczną podkładu przed nałożeniem warstwy wierzchniej [4]; warstwę szepną pomiędzy warstwą wierzchnią i podkładem [5], usuwa mleczko cementowe z powierzchni podkładu lub powierzchniowo odkrywa kruszywo podkładu [6]; wprowadza dodatki do zaprawy warstwy wierzchniej [7]. Natomiast w celu poprawy parametrów mechanicznych stwardniałej zaprawy warstwy wierzchniej wykorzystuje się następujące zabiegi: wzmacnianie zaprawy zbrojeniem rozproszonym (włókna); utwardzanie powierzchniowe warstwy wierzchniej (np. utwardzacz mineralne lub metaliczne); impregnowanie powierzchni warstwy wierzchniej oraz modyfikacja jej struktury przez stosowanie dodatków [8]. Na przestrzeni lat stosowano dodatki modyfikujące kompozyty cementowe o coraz mniejszych frakcjach począwszy od mikrododatków (różnego rodzaju mączki, popiół lotny czy drobnociąstkowe dodatki mineralne), aż do nanododatków [9, 10]. W literaturze sygnalizuje się, że jednym z dodatków, które można wykorzystać do warstw wierzchnich podłóg, są nanocząstki, ale wiedza na ten temat nie jest dostateczna [11, 12]. W związku z tym w artykule omówiono modyfikację zaprawy cementowej warstwy wierzchniej z wykorzystaniem czterech

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; jacek.szymanowski@pwr.edu.pl

rodzajów nanocząstek w celu poprawy jej wybranych właściwości (ścieralności oraz przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie).

Przygotowanie próbek

W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano skład trzynastu zapraw: jedna bez nanocząstek jako zaprawa referencyjna oraz po trzy serie zapraw z nanocząstkami SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , SnF_2 w ilości 0,5%, 1% i 1,5% masy cementu. Szczegółowa specyfikacja zastosowanych nanocząstek została przedstawiona w [13 ÷ 15]. Podkład zaprojektowano z betonu klasy C30/37 i grubości 12,5 cm. Skład mieszanki betonowej: 352,0 kg/m³ cementu portlandzkiego CEM II A-LL 42,5 R; 40 kg/m³ popiołu lotnego; 724,4 kg/m³ kopalnego piasku kwarcowego o uziarnieniu do 2 mm i gęstości objętościowej 2,62 g/cm³; 1086,6 kg/m³ kwarcowego kruszywa naturalnego otoczkowego o uziarnieniu do 8 mm i gęstości objętościowej 2,60 g/cm³. W celu uzyskania odpowiedniej konsystencji mieszanki betonowej użyto 2,0 l superplastyfikatora X na bazie polikarboksylianów o gęstości 1,07 g/cm³. Receptura mieszanki betonowej podkładu została przedstawiona w [15, 16]. Zaprawę cementową warstwy wierzchniej zaprojektowano jako klasy C60 (wytrzymałość na ściskanie) oraz F10 (wytrzymałość na zginanie). Użyto cementu CEM-I 42,5R, piasku kwarcowego suszonego (o maksymalnej średnicy ziarna do 2 mm) oraz superplastyfikatora Y na bazie polikarboksylianów w ilości 0,5% masy cementu. Skład zapraw przedstawiono w tabeli.

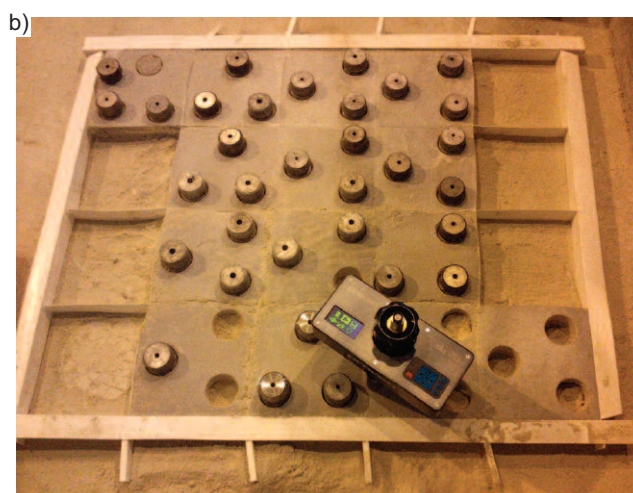
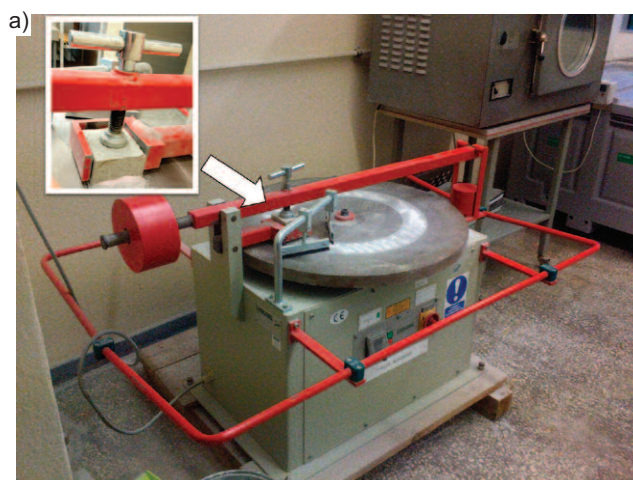
Skład zapraw cementowych modyfikowanych nanocząstkami
Composition of cement mortars modified with nanoparticles

Zawartość nanocząstek [%]	Piasek	Cement	Woda	Superplastyfikator	Rodzaj nanocząstek			
					SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	SnF_2
0	4000	2932	880	14,8	0	0	0	0
0,5	4000	2932	880	14,8	14,8	0	0	0
1	4000	2932	880	14,8	29,2	0	0	0
1,5	4000	2932	880	14,8	44	0	0	0
0,5	4000	2932	880	14,8	0	14,8	0	0
1	4000	2932	880	14,8	0	29,2	0	0
1,5	4000	2932	880	14,8	0	44	0	0
0,5	4000	2932	880	14,8	0	0	14,8	0
1	4000	2932	880	14,8	0	0	29,2	0
1,5	4000	2932	880	14,8	0	0	44	0
0,5	4000	2932	880	14,8	0	0	0	14,8
1	4000	2932	880	14,8	0	0	0	29,2
1,5	4000	2932	880	14,8	0	0	0	44

Procedura przygotowania świeżej zaprawy cementowej polegała na wymieszaniu nanocząstek wraz z wodą zarobową oraz superplastyfikatorem. Następnie dodawano cement i mieszano przez 45 s mieszarką automatyczną z prędkością obrotową 140 obrotów/min, a w dalszej kolejności piasek i ponownie mieszano całość przez kolejne 45 s z prędko-

ścią 140 obrotów/min, a potem dodatkowo przez 18 s z prędkością 285 obrotów/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%). Po 28 dniach przeprowadzono badania ścieralności na tarczy Boehmego wg [17].

W przypadku każdej serii zaprawy wykonano trzy próbki o wymiarach 71 x 71 x 71 mm w celu określenia ścieralności cementowej warstwy wierzchniej na tarczy Boehmego zgodnie z normą PN-EN 13892 [17]. Próbki wysuszone i umieszczono w ekssykatorach. Przed każdym cyklem ścierania tarcza została oczyszczona, a na pas ścierający równomiernie rozsypano materiał ścierny (Korund) w ilości 22 g. Próbki zamocowano w uchwycie, obciążono siłą 294±3 N i poddano szesnastu cyklom ścierania. Każdy cykl ścierania składał się z dwudziestu dwóch obrotów tarczy, a po czterech cyklach próbka była ważona oraz obracana o 90° w stosunku do swojej poprzedniej pozycji w uchwycie. Ścieralność określono jako ubytek masy oraz objętości próbki po szesnastu cyklach ścierania. Widok stanowiska badawczego w trakcie badania ścieralności pokazano na fotografii a.



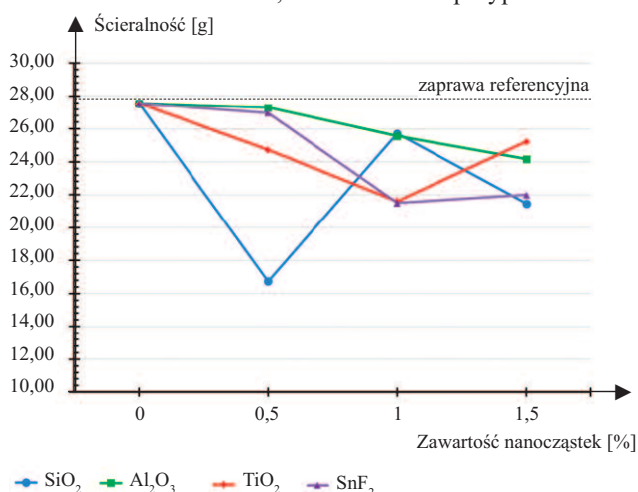
Widok stanowiska badawczego w trakcie badania: a) ścieralności; b) przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie zaprawy warstwy wierzchniej

View of the test stand during the tests: a) abrasion; b) subsurface tensile strength

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 PN-EN 1542 [18]. Zaprojektowano i wykonano element modelowy odwzorowujący podłogę. Składał się on z podkładu betonowego grubości 12,5 cm oraz warstwy wierzchniej o wymiarach 20 cm x 20 cm (w przypadku każdej serii zaprawy). Badanie przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie warstwy wierzchniej przeprowadzono metodą odrywania w przynajmniej trzech miejscach każdej serii zaprawy. W tym celu w warstwie wierzchniej wykonano odwierty o średnicy 50 mm i głębokości ok. 5 mm za pomocą wiertła koronowego i w ich miejscach przyklejono stalowe krążki o średnicy 50 mm. Po utwardzeniu kleju oderwano krążki za pomocą siłownika automatycznego Proceq DY 216 ze stałym przyrostem naprężeń 0,05 MPa/s oraz obliczono wartości wytrzymałości na rozciąganie przy odrywaniu. Widok stanowiska badawczego w trakcie badania przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie zaprawy warstwy wierzchniej pokazano na fotografii b.

Wyniki badań i ich analiza

Na rysunku 2 przedstawiono zależność ścieralności zapraw z wybranymi nanocząstkami od ich procentowej zawartości w stosunku do masy cementu. Dodatek każdej z badanych nanocząstek zmniejsza ścieralność zaprawy warstwy wierzchniej w stosunku do zaprawy referencyjnej. Najkorzystniejszy spadek ścieralności zaobserwowano w przypadku nanocząstek SiO_2 w ilości 0,5%. Wówczas ścieralność zmniejszyła się o ok. 39,2%. Poprawa ścieralności zaprawy cementowej warstwy wierzchniej w wyniku dodania nanocząstek SiO_2 (o frakcjach 12, 20, 40 i 100 nm) została opisana w [20]. W przypadku nanocząstek Al_2O_3 optymalna ich ilość to 1,5%, co zmniejsza ścieralność o ok. 12,2%. Z kolei w przypadku nano-



Rys. 2. Zależność ścieralności zapraw z nanocząstkami od ich procentowej zawartości w stosunku do masy cementu

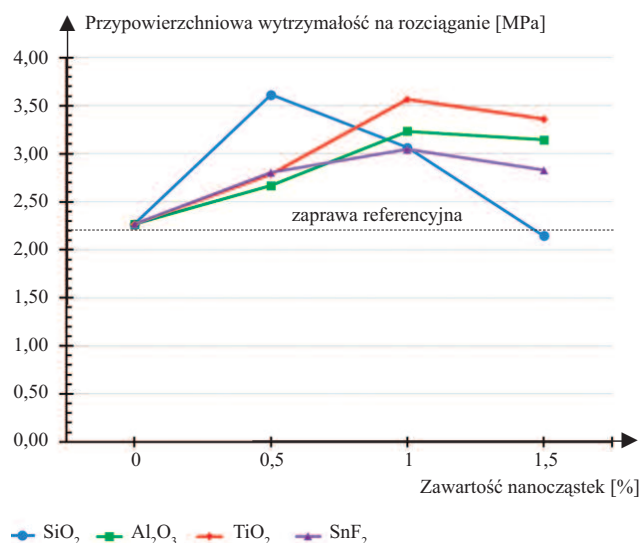
[Rys. opracowanie własne na podstawie 13 ÷ 15; 19]

Fig. 2. Function of abrasiveness of mortars with the nanoparticles on the percentage of its content in relation to the mass of cement

[Fig. based on 13 ÷ 15; 19]

cząstek TiO_2 oraz SnF_2 optymalną ilością jest 1%. Wówczas zaobserwowano spadek ścieralności odpowiednio o ok. 21,5% oraz 22%.

Rysunek 3 przedstawia zależność przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie zaprawy warstwy wierzchniej z dodatkiem nanocząstek od procentowej zawartości nanocząstek w stosunku do masy cementu. Wynika z niego, że każda z zastosowanych w badaniach nanocząstek korzystnie wpływa na przypowierzchniową wytrzymałość na rozciąganie warstwy wierzchniej, poza przypadkiem nanocząstek SiO_2 w ilości 1,5%, gdzie widoczny jest nieznaczny spadek tej wytrzymałości. Największy przyrost przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie zaobserwowano w przypadku nanocząstek SiO_2 w ilości 0,5% oraz TiO_2 w ilości 1%. W przypadku SiO_2 wzrost wytrzymałości wynosi ok. 59,4%, a w przypadku TiO_2 ok. 57,4%. W przypadku nanocząstek Al_2O_3 oraz SnF_2 optymalna ich ilość to 1% (przyrost wytrzymałości odpowiednio wynosi 42,6% i 34,6%).



Rys. 3. Zależność przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie zaprawy warstwy wierzchniej z nanocząstkami od ich procentowej zawartości w stosunku do masy cementu

[Rys. opracowanie własne na podstawie 13 ÷ 15; 19]

Fig. 3. Function of subsurface tensile strength of the mortar overlay with the nanoparticles on the percentage of nanoparticles in relation to the mass of cement

[Fig. based on 13 ÷ 15; 19]

Mechanizmy oddziaływania nanocząstek stosowanych w zaprawach cementowych i betonowych są przedmiotem intensywnych badań. W literaturze sygnalizuje się, że nanocząstki mogą odgrywać istotną rolę w procesie hydratacji, a także pełnić funkcję wypełniacza struktury zaprawy [21, 22]. Ponadto mogą być dodawane do zapraw i betonu, aby uzyskać specjalne właściwości, takie jak m.in.: odporność na starzenie w wysokiej temperaturze, samooczyszczanie, oczyszczanie powietrza, odporność na sól do odładzania, mrozodporność [23 ÷ 27]. Stosowane są one w celu poprawy właściwości zapraw i betonu, a także w celu uzyskania właściwości specjalnych. Ze względu na bardzo mały rozmiar nanocząstek (poniżej 100 nm) i dużą powierzchnię właściwą charakteryzują się dużo większą

reaktywnością w porównaniu z dodatkami o większych rozmiarach cząstek, jak np. pył krzemionkowy czy popiół lotny krzemionkowy [28]. Mając na uwadze zarówno wysoką reaktywność pozytywnie wpływającą na proces hydratacji (powodującą wzmocnienie struktury zaprawy), jak również bardzo mały rozmiar cząstek (wypełniacz struktury), nano-cząstki znacznie redukują porowatość zapraw [29 ÷ 31].

Podsumowanie

Celem artykułu było przedstawienie wpływu modyfikacji zaprawy cementowej warstwy wierzchniej podłogi nanocząstkami SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , SnF_2 na jej właściwości, takie jak ścieralność oraz przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie warstwy wierzchniej. Przebadano trzynaście serii zapraw różniących się procentową zawartością nanocząstek (0, 0,5, 1, 1,5 %) w stosunku do masy cementu. Wykazano, że generalnie dodatek każdej z badanych nanocząstek poprawia ścieralność oraz przypowierzchniową wytrzymałość na rozciąganie warstwy wierzchniej podłogi.

W przypadku ścieralności najkorzystniejsze jest zastosowanie nanocząstek SiO_2 w ilości 0,5%, co zmniejsza ścieralność o ok. 39,2%. Natomiast optymalną ilością nanocząstek Al_2O_3 jest 1,5%, a TiO_2 oraz SnF_2 – 1%.

Z kolei w przypadku przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie warstwy wierzchniej podłogi najkorzystniejsze jest zastosowanie nanocząstek SiO_2 w ilości 0,5%, co zwiększa przypowierzchniową wytrzymałość na rozciąganie o ok. 59,4% oraz TiO_2 w ilości 1%, co zwiększa ją o ok. 57,4%. Optymalna ilość nanocząstek Al_2O_3 oraz SnF_2 to 1%.

Literatura

- [1] Hajduk P. Projektowanie podłóg przemysłowych. 2013. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [2] Chmielewska B, Czarniecki L. Wymagania norm dotyczące posadzek przemysłowych. Materiały Budowlane. 2012; 2: 5 – 9.
- [3] Sadłowski K, Urbanowicz D, Warzocha M. Podkłady podłogowe: Wymagania, projektowanie, wykonawstwo. Materiały Budowlane. 2015; 11: 81 – 84.
- [4] 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.
- [5] Santos DS, Santos PM, 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.
- [6] Sadowski Ł. Adhesion in Layered Cement Composites; Springer. 2019; Berlin/Heidelberg, Germany, Volume 101.
- [7] Javed A, Gillani SAA, Abbass W, Riaz MR, Hameed R, Abbas S, Salmi A, Deifalla AF. Mechanical Performance of Amorphous Metallic Fiber-Reinforced and Rubberized Thin Bonded Cement-Based Overlays. Sustainability. 2022; 14, 8226.
- [8] Lin Y, Du H. Graphene reinforced cement composites: A review. Constr. Build. Mater. 2020; 265, 120312.
- [9] Czarniecki L. Nanotechnologia w budownictwie. Przegląd Budowlany. 2011; 1.
- [10] Silva JJ, Ismael R, Carmo RNF, Lourenço C, Soldado E, Costa H, Júlio E. Influence of nano- SiO_2 and nano- Al_2O_3 additions on the shear strength and the bending moment capacity of RC beams. Constr. Build. Mater. 2016; 123: 35 – 46.
- [11] Silva JJ, Ismael R, Carmo RNF, Lourenço C, Soldado E, Costa H, Júlio E. Influence of nano- SiO_2 and nano- Al_2O_3 additions on the shear strength and the bending moment capacity of RC beams. Constr. Build. Mater. 2016; 123: 35 – 46.
- [12] Mohseni E, Miyandehi BM, Yang J, Yazdi MA. Single and combined effects of nano- SiO_2 , nano- Al_2O_3 and nano- TiO_2 on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash. Construction and Building Materials. 2015; 84: 331 – 340.
- [13] Szymanowski JM, Sadowski Ł. Functional and adhesive properties of cement-based overlays modified with amorphous silica nanospheres. Journal of Adhesion. 2020, 96, nr 1-4: 207 – 228.
- [14] Szymanowski JM, Sadowski Ł. The influence of the addition of tetragonal crystalline titanium oxide nanoparticles on the adhesive and functional properties of layered cementitious composites. Composite Structures. 2020; 233, art. 111636: 1 – 11.
- [15] Szymanowski JM, Sadowski Ł. The development of nanoalumina-based cement mortars for overlay applications in concrete floors. Materials. 2019; 12, nr 21, art. 3465.
- [16] 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.
- [17] PN-EN 13892-3:2005 Metody badań materiałów na podkłady podłogowe – Część 3: Oznaczenie odporności na ścieranie według Boehmego.
- [18] PN-EN 1542:2005 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Pomiar przyrzepności przez odrywanie.
- [19] 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.
- [20] Haruehansapong S, Pulngern T, Chucheechakul S. Effect of nanosilica particle size on the water permeability, abrasion resistance, drying shrinkage, and repair work properties of cement mortar containing nano- SiO_2 . Advances in Materials Science and Engineering 2017.
- [21] Nivethitha D, Srividhya S, Dharmar S. Review on Mechanical Properties of Cement Mortar Enhanced with Nanoparticles. Int. J. Sci. Res. 2014, 5, 913 – 916.
- [22] Paul SC, van Rooyen AS, van Zijl GP, Petrik LF. Properties of cement-based composites using nanoparticles: A comprehensive review. Constr. Build. Mater. 2018; 189: 1019 – 1034.
- [23] Krakowiak KJ, Thomas JJ, 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.
- [24] Diamanti MV, Paolini R, Rossini M, Aslan AB, Zinzi M, Poli T, Pedferri MP. Long term self-cleaning and photocatalytic performance of anatase added mortars exposed to the urban environment. Constr. Build. Mater. 2015; 96: 270 – 278.
- [25] Mohammed A, Sanjayan JG, Duan WH, Nazari A. Graphene Oxide Impact on Hardened Cement Expressed in Enhanced Freeze – Thaw Resistance. J. Mater. Civ. Eng. 2016; 28, 4016072.
- [26] Beeldens A. An environmental friendly solution for air purification and self-cleaning effect: the application of TiO_2 as photocatalyst in concrete. In Proceedings of the Transport Research Arena Europe – TRA, Göteborg, Sweden, 12-15 June 2006; pp. 12 – 16.
- [27] 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.
- [28] Liu J, Li Q, Xu S. Influence of nanoparticles on fluidity and mechanical properties of cement mortar. Constr. Build. Mater. 2015; 101: 892 – 901.
- [29] Wang L, Zheng D, Zhang S, Cui H, Li D. Effect of Nano- SiO_2 on the Hydration and Microstructure of Portland Cement. Nanomaterials 2016; 6, 241.
- [30] Ng DS, Paul SC, Anggraini V, Kong SY, Qureshi TS, Rodriguez CR, Liu QF, Šavija B. Influence of SiO_2 , TiO_2 and Fe_2O_3 nanoparticles on the properties of fly ash blended cement mortars. Constr. Build. Mater. 2020; 258, 119627.
- [31] Francioso V, Moro C, Martinez-Lage I, Velay-Lizancos M. Curing temperature: A key factor that changes the effect of TiO_2 nanoparticles on mechanical properties, calcium hydroxide formation and pore structure of cement mortars. Cement and Concrete Composites. 2019; 104, 103374.

Projekt został dofinansowany przez Narodowe Centrum Nauki w ramach programu Preludium 20 – grant nr 2021/41/N/ST8/03412.

Przyjęto do druku: 20.05.2024 r.