

Właściwości mechaniczne betonów z dodatkiem makrowłókien poliolefinowych

Mechanical properties of concretes with the addition of polyolefin macrofibers

dr inż. Paweł Helbrych (ORCID: 0000-0001-6907-0363), Politechnika Częstochowska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1306

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu dwóch typów makrowłókien poliolefinowych na właściwości świeżego i stwardniałego betonu. Określono zawartość powietrza w mieszance betonowej, klasę konsystencji, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość betonu na rozciąganie w próbie zginania oraz wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu. Wykazano istotny wpływ rodzaju, kształtu i budowy włókien syntetycznych na właściwości mechaniczne betonu. Dodatek włókien poliolefinowych nie wpłynął negatywnie na wytrzymałość na ściskanie betonu, a serie badawcze z mniejszą ilością włókien fibrylowanych uzyskały podobne lub lepsze wyniki wytrzymałościowe niż serie z większą ilością foliowłókien. Wyniki te wskazują na potencjał wykorzystania makrowłókien polimerowych w konstrukcjach betonowych, co pozwoli na poprawę jego wytrzymałości i innych istotnych właściwości.

Słowa kluczowe: makrowłókna poliolefinowe, syntetyczne zbrojenie rozproszone, beton, kompozyty.

Abstract: The article presents the results of research on the influence of two types of polyolefinic macrofibers on the properties of fresh and hardened concrete. The content of air in the concrete mix, consistency class, compressive strength, tensile strength of concrete in flexural testing, and splitting tensile strength were determined. The significant impact of the type, shape, and structure of synthetic fibers on the mechanical properties of concrete has been demonstrated. The addition of polyolefin fibers did not have a negative effect on the compressive strength of concrete, and research series with a smaller amount of fibrillated fibers achieved similar or better strength results than series with a larger amount of film fibers. These results indicate the potential use of polymer macrofibers in concrete structures, which will allow for the improvement of its strength and other important properties.

Keywords: Polyolefin macrofibers, synthetic dispersed reinforcement, concrete, composites.

1. Wprowadzenie

Zróznicowany postęp technologiczny skłania przemysł materiałów budowlanych do spełniania coraz wyższych wymagań jakościowych w celu sprostania dynamicznie ewoluującym potrzebom rynku. Staranność w zachowaniu jakości procesów produkcji odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu jakości ostatecznego produktu budowlanego [1]. Nieustannie wprowadzane nowości technologiczne w różnych dziedzinach przemysłu, w tym w budownictwie, wymagają od inwestorów dokładnych analiz i ocen związanych z opłacalnością i ryzykiem związanym z wdrożeniem nowych rozwiązań technologicznych oraz materiałów budowlanych na rynek. Szczególnie istotnym elementem tych ocen jest jakość końcowego materiału budowlanego oraz jakość procesów technologicznych [2].

W procesach produkcji budowlanej wykorzystuje się i bada możliwości rozwoju właściwości mechanicznych poprzez dodatki i domieszki do betonu. Część rozwiązań bazuje na optymalizacji znanych już rozwiązań lub na rozwoju znanych technologii, a niektóre wskazują na konieczność recyklingu odpadów [3–5]. Warto podkreślić, że wykorzystanie dodatków i domieszek w produkcji betonu nie zawsze gwarantuje zwiększenie kluczowych parametrów betonu, takich jak

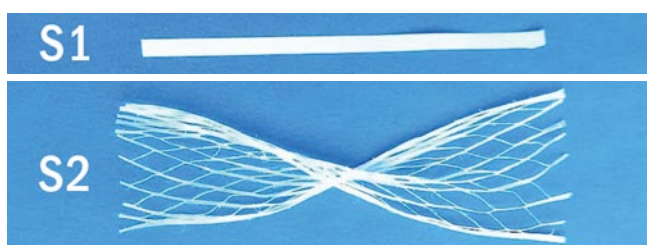
wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na rozciąganie w próbie zginania, które są istotne z punktu widzenia jakości betonu zależnie od jego zastosowania. Równie ważne są właściwości związane z klasą konsystencji i urabialnością, które wpływają na jakość technologii układania betonu w miejscu jego przeznaczenia. Dlatego w celu polepszenia parametrów wytrzymałościowych betonu oraz redukcji ryzyka wystąpienia pęknięć, stosuje się dodatki w postaci włókien. Najczęściej wykorzystywane są włókna stalowe, polimerowe, szklane i naturalne [6]. Włókna syntetyczne zgodnie z [7] to proste lub odkształcone fragmenty wytłaczanego, zorientowanego i ciętego materiału polimerowego, które są stosowane w celu uzyskania jednorodnej mieszanki betonowej. Włókna syntetyczne w betonie występują w formie krótkich, cienkich nitok (o długości do 30 mm) o małej średnicy (0,02–0,05 +/- 0,005 mm) lub sztywnych prętów o średnicy (0,2–0,5 +/- 0,05 mm) i długości do 60 mm. Wytwarzane są z różnych tworzyw sztucznych, takich jak polipropylen (PP), polietylen (PE), poliester (PET) czy poliamid (PA). Tego typu włókna są dodawane do betonu, zapraw i innych materiałów budowlanych w celu poprawy ich właściwości mechanicznych i trwałości [6, 8]. Dzięki temu można zmniejszyć ryzyko pojawienia się mikropęknięć i zwiększyć trwałość betonu, zwłaszcza w przypadku konstrukcji posadzek przemysłowych, ale także

mostów, dróg, chodników i płyt fundamentowych. Zastosowanie syntetycznych makrowłókien w betonie pomaga zmniejszyć ryzyko powstawania spękań termicznych podczas procesu utwardzania. Dzięki temu unika się potrzeby stosowania tradycyjnych siatek stalowych w betonie. Betony z domieszką syntetycznych makrowłókien mają większą zdolność do absorbowania energii uderzenia, co jest korzystne w przypadku konstrukcji podatnych na obciążenia dynamiczne, takie jak np. posadzki przemysłowe [9, 10]. Syntetyczne makrowłókna mogą zwiększać odporność betonu na korozję spowodowaną działaniem substancji chemicznych, co jest szczególnie ważne w przypadku konstrukcji w obszarach przemysłowych lub wodociągowych. W budownictwie geotechnicznym syntetyczne makrowłókna mogą być stosowane do wzmacniania gruntów i redukcji osiadania pod budynkami lub drogami. Ponadto mogą być stosowane do wzmocnienia konstrukcji wodoszczelnych, takich jak zbiorniki wodne, baseny czy tunele. W połączeniu z tradycyjnym stalowym zbrojeniem włókna tego typu mogą być stosowane w konstrukcjach takich jak ściany oporowe lub konstrukcje mostowe [11, 12]. Celem pracy było określenie wpływu włókien wykonanych z tworzyw sztucznych (poliolefin) o różnej budowie, tej samej długości i tym samym materiale na właściwości mechaniczne mieszanki betonowej oraz gotowego wyrobu betonowego. Ponadto podczas prac badawczych określono cechę świeżej mieszanki betonowej w postaci klasy konsystencji. Wyniki zestawiono z serią kontrolną bez dodatku włókien.

2. Metodyka badań i materiały

W badaniach wykorzystano dwa rodzaje włókien polimerowych wykonanych z poliolefinu. Obojętne dla środowiska tego typu włókna powstają wskutek syntezy wielocząsteczkowego polietylenu i składają się z wodoru oraz węgla. Wybrane do badań włókna przedstawiono na rysunku 1. Pierwszy rodzaj wykorzystanych włókien w badaniach to makrowłókna o kształcie foliowłókna, a drugi typ włókien to makrowłókna skręcone, fibrylowane. Oba rodzaje włókien spełniają wymagania normy [7], a ich właściwości przedstawiono w tabeli 1.

Mieszankę betonową do badań projektowano metodą doświadczalną tzw. metodą znanego zaczynu. W badaniach wstępnych z powodu zmniejszenia urabialności mieszanki betonowej wskutek dodania włókien syntetycznych zdecydowano



Rys. 1. Typy włókien poliolefinowych wykorzystanych w badaniach: S1 – foliowłókna, S2 – włókna fibrylowane (opracowanie własne)

Tabela 1. Właściwości syntetycznych włókien wykorzystanych w badaniach (opracowanie własne)

Właściwości	TYP 1 (S1)	TYP 2 (S2)
Materiał	czysty poliolefin	czysty, uszlachetniony poliolefin
Postać	foliowłókno	włókno skręcone, fibrylowane
Gęstość	0,91 g/cm ³	0,91 g/cm ³
Długość	50 mm ± 5mm	50 mm ± 5mm
Szerokość	0,9 mm	zmienna
Kolor	beż	biały
Odporność na kwasy/zasady	obojętny	obojętny
Wytrzymałość na rozciąganie	≈ 400 N/mm ²	≈ 400 N/mm ²
Moduł sprężystości	≈ 4500 N/mm ²	≈ 4500 N/mm ²
Temperatura mięknienia	≈ 150°C	≈ 150°C
Grubość folii/włókna	42 μm	≈ 80 μm

się na zaprojektowanie mieszanki w klasie konsystencji S4. Z tego względu niezbędne okazało się wykorzystanie domieszki upłynniającej i uplastyczniającej. Przyjęto wskaźnik $c/w = 2,5$, $w/c = 0,40$. Klasę wytrzymałości projektowanego betonu ustalono na C35/45. Przeznaczenie mieszanki betonowej to posadzka w hali przemysłowej. Do badań zaprojektowano mieszankę betonową, w skład której wchodziły szeroko stosowane i łatwo dostępne składniki, takie jak: cement portlandzki CEM I 42,5R, kruszywo żwirowe o frakcji 2–8 mm oraz 8–16 mm, piasek o frakcji 0–2 mm, domieszka ISOFLOW 755 uplastyczniająca i upłynniająca według [13] w ilości 2% masy cementu. Mieszankę kruszyw skomponowano metodą doświadczalną. Kruszywa mieszano w stanie suchym, a krzywca uziarnienia dobranej mieszanki kruszyw mieściła się w górnej części krzywych granicznych. Ostateczny skład mieszanki betonowej przedstawiono w tabeli 2.

Ze względu na porównawczy charakter analizy produkcja mieszanki betonowej przebiegała w taki sposób, aby mieszanie składników odbywało się w możliwie jak najkrótszym czasie, zapewniając jednocześnie równomierne rozłożenie jej składników. Składniki mieszanki betonowej odmierzano wagowo. Dozowanie składników odbywało się dokładnie w tej samej kolejności w poszczególnych seriach badawczych. Dla każdej serii najpierw mieszano włókna syntetyczne z kruszywem, a później dozowano resztę składników. Każdą serię badawczą wykonywano w ten sam sposób i przestrzegano tego samego czasu mieszania dla wszystkich próbek. Formy wykorzystane w badaniach spełniały wymagania [14]. Mieszankę układano w dwóch warstwach, które zagęszczano, czas zagęszczania był taki sam dla wszystkich serii badawczych (2x30 sekund). Formowanie próbek było zgodne z wytycznymi zawartymi w normie [15]. Rozformowanie próbek odbywało się po upływie 24 godzin od uformowania, następnie

Tabela 2. Skład mieszanki betonowej wykorzystanej w badaniach (opracowanie własne)

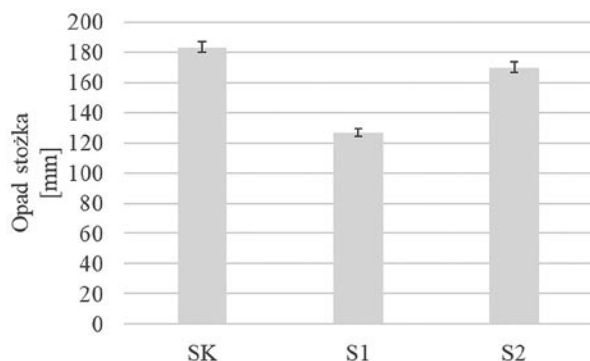
Seria	SK	S1	S2
Skład	Masa, [kg/m ³]		
Cement	380	380	380
Woda	148	148	148
Kruszywo 2/8	439	439	439
Kruszywo 8/16	685	685	685
Piasek 0/2	628	628	628
Domieszka uplastyczniająca i upłynniająca	7,6	7,6	7,6
Zbrojenie rozproszone typu 1	-	2	-
Zbrojenie rozproszone typu 2	-	-	1

do momentu badań przechowywano w temperaturze 20±2°C i wilgotności względnej powietrza wynoszącej 100%.

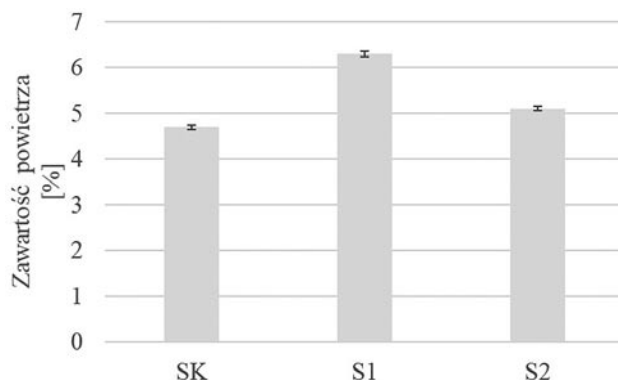
3. Wyniki badań

W badaniach wykonano trzy serie badawcze: seria kontrolna (SK), seria z dodatkiem włókien typu 1 oznaczona jako S1 oraz seria z dodatkiem włókien typu 2 (S2). Każda z serii badawczych składała się z co najmniej 9 próbek. Rodzaj i kształt wykorzystanych w badaniach włókien wyraźnie wpłynęły na wyniki badań świeżego betonu w kontekście konsystencji i zawartości powietrza. Konsystencję badano metodą opadu stożka według [16], a wyniki przedstawiono na rysunku 2. Zawartość powietrza badano metodą ciśnieniową wg normy [17], a wyniki przedstawiono na rysunku 3.

Dodatek włókien syntetycznych wpłynął na zmianę konsystencji mieszanki betonowej. Mieszanka z włóknami fibrylowanymi (S2) była bardziej płynna niż mieszanka z foliowłóknami. W przypadku serii z dodatkiem foliowłókien klasę konsystencji według wymagań normy [19] można określić jako S3, w pozostałych przypadkach jako planowaną S4. Pomiar zawartości powietrza w mieszance z foliowłóknami wskazuje większe wartości, niż w przypadku serii z dodatkiem włókien fibrylowanych. Zawartość powietrza w mieszance betonowej przy użyciu foliowłókien wynosiła 6,3%, natomiast w przypadku włókien fibrylowanych 5,1%. Obie zależności wynikają z różnicy w kształcie między dwoma



Rys. 2. Wyniki badań klasy konsystencji badanych mieszanek betonowych

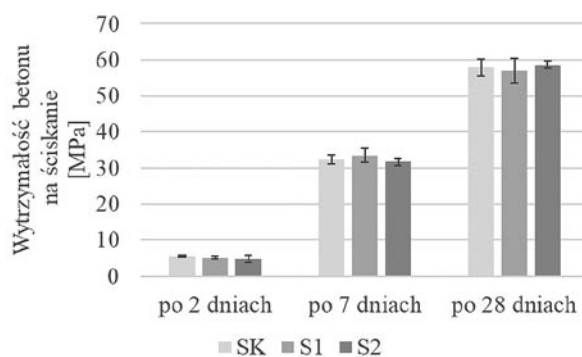


Rys. 3. Wyniki badań zawartości powietrza

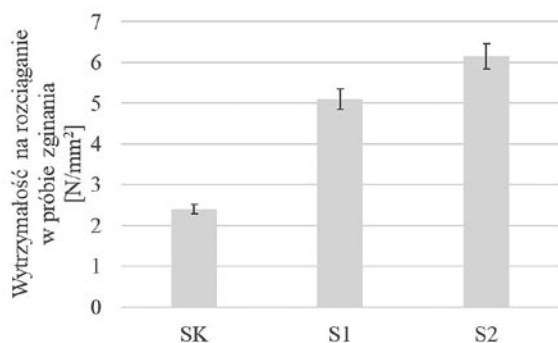
typami włókien. Fibrylowane mikrowłókna łatwiej łączą się z resztą mieszanki betonowej, co skutkuje większą płynnością oraz niższą zawartością powietrza w mieszance.

Badania wytrzymałości na ściskanie betonu przeprowadzono po 2, 7 i 28 dniach według [18]. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 4. Wytrzymałość betonu na rozciąganie w próbie zginania – belka wolnopodparta obciążona symetrycznie jedną siłą badano po 28 dniach według metody opisanej w [19], a wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 5. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu oznaczone według [20] przedstawiono na rysunku 6.

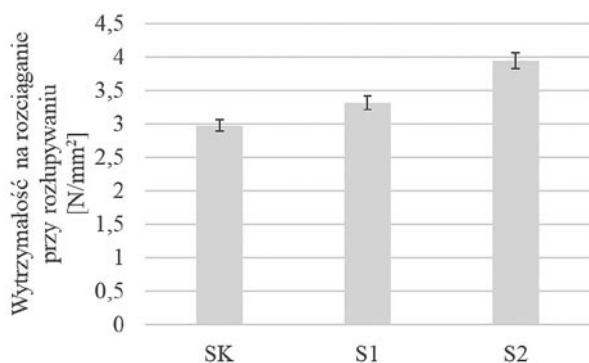
W przypadku wytrzymałości na ściskanie to przyrost wytrzymałości dla wszystkich serii badawczych jest podobny. Badania wykazały, że dla obu mieszanek wykonany beton ma znacznie większą wytrzymałość na ściskanie. Według normy [21] wykonany beton ze względu na wytrzymałość na ściskanie można zaklasyfikować jako C55/67. Docelowa wytrzymałość na ściskanie jest nieznacznie wyższa w przypadku włókien fibrylowanych. Średnia wytrzymałość na ściskanie dla próbki z foliowłóknem po 28 dniach była niższa o 1,62 MPa od średniej wytrzymałości na ściskanie dla serii z włóknami fibrylowanymi. Badanie wytrzymałości na zginanie pokazało znaczącą różnicę pomiędzy wszystkimi seriami badawczymi. Największą wytrzymałość uzyskała seria S2 z dodatkiem włókien fibrylowanych, która wynosiła 6,15 MPa i była wyższa od serii S1 o 1,05 MPa. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu również wykazało, że najlepszy wynik uzyskała seria S2 z dodatkiem włókien fibrylowanych. Wytrzymałość



Rys. 4. Wyniki badań wytrzymałości betonu na ściskanie po 2, 7 i 28 dniach



Rys. 5. Wyniki badań wytrzymałości betonu na rozciąganie w próbie zginania – belka wolnopodparta obciążona symetrycznie jedną siłą po 28 dniach



Rys. 6. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

na rozciąganie przy rozłupywaniu serii S2 wyniosła 3,94 MPa i była wyższa od serii S1 o 0,63 MPa. Włókna podczas mieszania nie tworzyły zbitych brył w mieszance. Zarówno foliowłókna, jak i włókna fibrylowane rozprzodzały się w mieszance w sposób jednorodny, jednakże podczas badań zauważono, iż około 25% włókien fibrylowanych nie wykształciło się do postaci rozwiniętej, co mogło się przyczynić do pogorszenia wyników wytrzymałościowych.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że dodatki włókniste nie powodują problemów na etapie dozowania, jednak wpływają znacząco na zmianę konsystencji betonu w szczególności w przypadku badanych włókien syntetycznych, gdzie klasa konsystencji zmieniła się z S4 (beton kontrolny) do S3 (seria S1). Ponadto wraz z dodatkiem większej ilości włókien poliolefinowych zmienia się urabialność mieszanki betonowej, co można było zaobserwować podczas przygotowywania mieszanki betonowej, wypełniania form i wibrowania. Rodzaj, kształt i budowa włókien nawet w przypadku wykonania z tego samego materiału nie pozostają bez znaczenia. Wyniki potwierdzają zasadność stosowania włókien fibrylowanych. W seriach badawczych zastosowano 50% mniej włókien fibrylowanych niż foliowłókien. W przypadku wytrzymałości na ściskanie wyniki były zbliżone do siebie, natomiast w przypadku zbadanej wytrzymałości na rozciąganie

przy rozłupywaniu seria z dodatkiem włókien fibrylowanych uzyskała wyniki o 21% lepsze niż serie z dodatkiem foliowłókien. Jeśli chodzi o wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, to seria z dodatkiem włókien fibrylowanych uzyskała wyniki o 19% lepsze niż seria z foliowłóknami. Dodatek włókien syntetycznych do betonu w ilości jak w przeprowadzonych badaniach nie wpływa niekorzystnie na wytrzymałość na ściskanie betonu i korzystnie w przypadku innych badanych właściwości mechanicznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Prasalska-Nikoniuł J., Urbański M., Ulewicz R., ISO 9001:2015 vs. Factory Production Control (FPC) to ensure the quality of construction products used in road and bridge engineering, *BoZPE*. 11/2022, str. 103–111, <https://doi.org/10.17512/bozpe.2022.11.12>
- [2] Guo F., Wang J., Song Y., Research on high quality development strategy of green building: A full life cycle perspective on recycled building materials, *Energy and Buildings*, 273. 2022, str. 112406, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112406>
- [3] Pietrzak A., Wpływ popiołów powstałych ze spalania osadów ściekowych na podstawowe właściwości mechaniczne betonu, *BoZPE*, 2019, str. 29–35, <https://doi.org/10.17512/bozpe.2019.1.03>
- [4] Ulewicz M., Pietrzak A., Properties and Structure of Concretes Doped with Production Waste of Thermoplastic Elastomers from the Production of Car Floor Mats, *Materials* 14, 2021, str. 872, <https://doi.org/10.3390/ma14040872>
- [5] Jura J., Ulewicz M., Assessment of the Possibility of Using Fly Ash from Biomass Combustion for Concrete, *Materials*. 14, 2021, str. 6708, <https://doi.org/10.3390/ma14216708>
- [6] Kurpińska M., Włókna polimerowe jako alternatywa włókien stalowych stosowanych w betonie, *Construction Materials* 1/2015, str. 44–46, <https://doi.org/10.15199/33.2016.02.13>
- [7] PN-EN 14889-2:2007: Włókna do betonu – Część 2: Włókna polimerowe – Definicje, wymagania i zgodność
- [8] Wiater A., Siwowski T., Comparison of Tensile Properties of Glass Fibre Reinforced Polymer Rebars by Testing According to Various Standards, *Materials* 13, 2020, str. 4110, <https://doi.org/10.3390/ma13184110>
- [9] Tadiboina N.V.V.K., Narayana Rao U.V., Investigation of Mechanical Properties of M-sand concrete with Polypropylene and Steel fibers, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1130 (2023), str. 012047, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1130/1/012047>
- [10] Mayer P., Kaczmar J., Właściwości i zastosowania włókien węglowych i szklanych, 2008
- [11] Helbrych P., Effect of dosing with propylene fibers on the mechanical properties of concretes, *BoZPE*, 2021, str. 39–44, <https://doi.org/10.17512/bozpe.2021.2.05>
- [12] Oh S., Hong G., Choi S., Determining the effect of superabsorbent polymers, macrofibers, and resting time on the rheological properties of cement mortar using analysis of variance (ANOVA): A 3D printing perspective, *Journal of Building Engineering*. 75, 2023, str. 106967, <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.106967>
- [13] PN-EN 934-2+A1:2012: Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 2: Domieszki do betonu – Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie
- [14] PN-EN 12390-1:2021-12: Badania betonu – Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badań i form
- [15] PN-EN 12390-2:2019-07: Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
- [16] PN-EN 12350-2:2019-07: Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
- [17] PN-EN 12350-7:2019-08: Badania mieszanki betonowej – Część 7: Zawartość powietrza – Metody ciśnieniowe
- [18] PN-EN 12390-3:2019-07: Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [19] PN-EN 12390-5: Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań
- [20] PN-EN 12390-6:2011: Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań
- [21] PN-EN 206+A2:2021-08: Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność