

# Wybrane aspekty nośności konstrukcji powłokowej podziemnego obiektu magazynowego

Selected aspects of the loading capacity of the shell structure of an underground storage facility

dr inż. Jacek Partyka (ORCID:0000-0002-8477-629X), dr inż. Piotr Krysiak (ORCID:0000-0002-4760-5053), Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej, dr inż. Elżbieta Kokocińska-Pakiet (ORCID:0000-0003-4502-6901), Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Opolska, Grzegorz Przybyłko, Piwniczki Sp. z o.o.

DOI: 10.5604/01.3001.0054.4878

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono przebieg i wyniki badań eksperymentalnych nośności konstrukcji powłokowej modelu podziemnego obiektu magazynowego. W przeprowadzonych badaniach wytrzymałościowych określono nośność konstrukcji modelu w wyniku oddziaływania ustalonego obciążenia siłą skupioną, a także wskazano na wielkości odkształceń elementów konstrukcyjnych modelu i zasypu gruntowego pod wpływem tego obciążenia. Ponadto określono wartość maksymalnego obciążenia, w wyniku którego uwidoczniły się na wewnętrznej powierzchni powłoki modelu, uszkodzenia w postaci rys i pęknięć. Badania eksperymentalne miały na celu potwierdzenie deklarowanej przez Producenta nośności konstrukcji i posłużyć do wypracowania wniosków, mających na celu optymalizację technologii wytwarzania innych wyrobów przez producenta – Piwniczki Sp. z o.o.

**Słowa kluczowe:** powłoka, moduł, nośność, geokrata, zasyp gruntowy.

**Abstract:** The paper presents the course and results of experimental tests of the load-bearing capacity of the shell structure of a model of an underground warehouse facility. In the strength tests carried out, the load-bearing capacity of the model structure was determined as a result of the impact of a fixed concentrated force load, and the amounts of deformation of the model's structural elements and the soil backfill under the influence of this load were also indicated. In addition, the value of the maximum load was determined, as a result of which damage in the form of scratches and cracks was visible on the inner surface of the model coating. The experimental tests were aimed at confirming the load-bearing capacity of the structure declared by the manufacturer and will be used to develop conclusions aimed at optimizing the technology of producing other products by the manufacturer – Piwniczki Sp. z o.o.

**Keywords:** coating, module, load-bearing capacity, geogrid, soil fill.

## 1. Wprowadzenie

Podziemne obiekty magazynowe zwane również piwniczkami lub ziemiankami, ze względu na zastosowanie praktyczne są głównie obiektami służącymi do przechowywania produktów spożywczych. Stanowią także interesujące rozwiązanie pod względem konstrukcyjnym, a z uwagi na walory dekoracyjne – również jako interesujące przykłady elementów architektury ogrodowej.

W niniejszym artykule przedstawiono badania eksperymentalne modelu piwniczki, zwracając w szczególności uwagę na wartość maksymalnego obciążenia, w wyniku którego widoczne będą na wewnętrznej powierzchni powłoki modelu, uszkodzenia w postaci rys i pęknięcia. Ma to duże znaczenie dla oceny nośności konstrukcji oraz jej bezpiecznego użytkowania i służy działaniom związanym z optymalizacją technologii wytwarzania wyrobu.

Celem opracowania jest więc potwierdzenie i ocena poprawności przyjętych założeń projektowych modułu, uzyskana na podstawie badań eksperymentalnych.

Piwniczka jest obiektem częściowo zagłębionym w gruncie. W pracach [1, 2] autorzy stwierdzają, że podziemne obiekty przestrzenne stanowią bezpieczny sposób przechowywania produktów żywnościowych. Jest to zapewnione dzięki wykorzystaniu właściwości gruntu, jako izolatora termicznego, który sprzyja utrzymywaniu się temperatury od 4 do 8°C. Ponadto istotnym aspektem izolacji termicznej jest rodzaj konstrukcji podziemnej, ponieważ różne zastosowane materiały budowlane mogą zapewnić odmienną wymianę ciepła. Często stosowanym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest system powierzchniowy, którego środkowa powierzchnia jest zakrzywiona, tworząc powłokę. Od wielu lat powłoka odgrywa ważną rolę w kształtowaniu przestrzeni danego obiektu, a charakterystykę jej rozwoju

można prześledzić na podstawie monografii [3], a także prac [4, 5]. Obecny stan wiedzy z zakresu mechaniki powłok, związany z przeprowadzeniem eksperymentalnych badań wytrzymałościowych omówiony został przez autorów w pracach [6–13]. Ponadto w wymienionych opracowaniach autorzy dokonali przeglądu postępu badań i trendów w obszarze konstrukcji. Opisali zachowanie się cylindrycznych konstrukcji powłokowych pod wpływem skoncentrowanego obciążenia, w szczególności wyboczenie konstrukcji, maksymalne ugięcie i wytrzymałość konstrukcji powłokowej, aż do fazy uplastycznienia materiału. Ponadto zwrócili uwagę na wpływ kształtu powłok, także współpracujących z gruntem, oraz ich odporność na oddziaływanie obciążeń zewnętrznych i wewnętrznych.

Ze względu na współpracę powłoki z otaczającym gruntem w przenoszeniu obciążeń konstrukcja taka jako gruntowo-powłokowa znajduje szerokie zastosowanie. W pracach [14–18] autorzy wskazują na wykorzystanie konstrukcji powłokowo-gruntowej w budownictwie komunikacyjnym, z uwagi na ich wiele zalet, takich jak: prosty i nieskomplikowany montaż, szybkość wykonawstwa, sztywność użytkowa oraz trwałość.

Obiekt, którego model został poddany badaniom eksperymentalnym, także ma konstrukcję gruntowo-powłokową. Gruntem współpracującym z konstrukcją powłoki jest zasypka układana nad sklepieniem i wzdłuż zakrzywionej powierzchni, stanowiąca obciążenie powłoki w fazie budowy obiektu.

Konstrukcja powłoki wykonana jest w technologii PwK („Piana w Kracie”), która polega na wypełnieniu geokraty pianą poliuretanową. Geokrata tworzy w tym przypadku system lekkiej przestrzennej konstrukcji, składający się z sekcji geosiatek komórkowych, zapewniających możliwość wypełnienia pianą. Dzięki wielu uniwersalnym zastosowaniom przedstawionym w pracach [19–21], a także w celu zwiększenia wytrzymałości i sztywności konstrukcji w połączeniu z innymi materiałami, o czym napisano w szczególności w pracy [22], geokrata stanowi wygodne i łatwe rozwiązanie, znacznie zwiększające i przyspieszające możliwość realizacji różnych prac.

Z kolei piana poliuretanowa, dzięki posiadaniu odpowiednich właściwości termoizolacyjnych i mechanicznych, przedstawionych między innymi w pracach [23, 24], znalazła szerokie zastosowanie w wielu konstrukcjach.

W rzeczywistych warunkach eksploatacji obiektu konstrukcja powłoki ma promień wewnętrzny 2,00 m i składa się z prefabrykowanych modułów o grubości 20 cm i szerokości 90 cm, posadowionych na geokracie wypełnionej kruszywem granitowym lub bazaltowym wraz z geowłókniną separacyjną i folią, która stanowi izolację przeciwilgociową. Moduły wykonane są ze sklejki szalunkowej. Powłoka nośna pokryta jest 14 cm warstwą superabsorbenta wody, z geokratą wypełnioną substratem i warstwą roślinną. Obiekt wyposażony jest w stolarkę drzwiową

o odpowiednich parametrach izolacyjności termicznej, z funkcjonującą wentylacją grawitacyjną oraz instalacją elektryczną. Całość tworzy interesującą i zwięzłą formę architektoniczną, dostosowaną do otaczającego krajobrazu. Przykładową piwniczkę wykonaną przez producenta i użytą przez inwestorów przedstawiono na rysunku 1.



**Rys. 1.** Widok ogólny piwniczki z wejściem na poziomie otaczającego terenu [28]

Usytuowanie piwniczki przedstawionej na rysunku 1 uwzględnia potrzeby osób niepełnosprawnych, ponieważ wejście może znajdować się na poziomie terenu przyległego do piwniczki, w celu ułatwienia dostępu do niej.

## 2. Metodyka, zakres i cel badań eksperymentalnych modelu

Głównym elementem stanowiska badawczego była dwukolumnowa uniwersalna maszyna wytrzymałościowa INSTRON 4469. Badania eksperymentalne przeprowadzono, wykorzystując metodykę obowiązującą dla statycznej próby ściskania, która jest przykładem testu mechanicznego, na podstawie którego wyznacza się właściwości mechaniczne badanego wyrobu, a także wykorzystując wytyczne i zasady, przedstawione przez autorów w pracach [25, 26]. Zakres badań obejmował przeprowadzenie badania laboratoryjnego elementów konstrukcji nośnej modelu i zasypu gruntowego, a w szczególności przygotowanie oprogramowania BLUEHILL 2 sterującego maszyną wytrzymałościową, w celu wykonania badań nośności konstrukcji modelu, przygotowanie stanowiska badawczego do badań poprzez wyposażenie w metalowe elementy pomocnicze (do podstawy modelu oraz pod głowicę maszyny wytrzymałościowej) i przeprowadzenie zasadniczych badań nośności elementów konstrukcji nośnej modelu i zasypu gruntowego.

Obiektem badań przedstawionym na rysunku 2, był model „Piwniczki PwK” o konstrukcji powłokowej (łukowej), na planie prostokąta. Modułowy szkielet modelu, wykonano ze sklejki szalunkowej i podparto na bocznych krawędziach. Model

został wykonany w skali 1:10, przez producenta – Piwniczki Sp. z o.o. Drewniany szkielet ściany frontowej i tylnej, których głównymi elementami były słupki ścian i nadproży, wypełniono termoizolacją (styropian). Ściany pozostały otwarte dla potrzeb wizualizacji przebiegu badania i oceny wielkości powstałych uszkodzeń powłoki modelu. Elementem wypełniającym modułowy ustrój nośny był innowacyjny system PwK oparty na geokracie. Powłoka modelu od zewnątrz została obsypana gruntem (humus), który wstępnie zagęszczono. Od strony wewnętrznej powłoki, wykończenie stanowił cienkowarstwowy tynk. Na potrzeby przeprowadzenia badań model miał dodatkowo elementy wykonane ze sklejki i pleksi, ograniczające obustronnie zasyp gruntowy.



Fot. Jacek Partyka

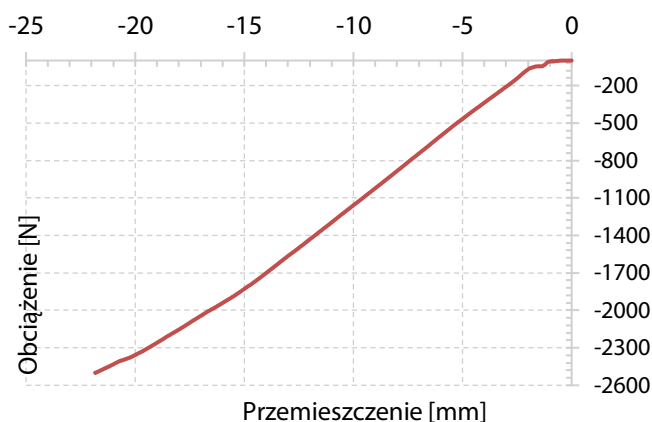
**Rys. 2.** Model „Piwniczki PwK” przed badaniami

Celem badań było:

- określenie nośności konstrukcji modelu w wyniku oddziaływania ustalonego obciążenia o wartości 2500 N;
- określenie wielkości odkształceń elementów konstrukcyjnych modelu i zasypu gruntowego pod wpływem obciążenia;
- wskazanie wartości maksymalnego obciążenia, w wyniku którego widoczne będą na wewnętrznej powierzchni powłoki modelu, uszkodzenia w postaci rys i pęknięć;
- ocena nośności konstrukcji i wypracowanie wniosków służących optymalizacji technologii wytwarzania wyrobu – Piwniczki PwK.

### 3. Przebieg badań eksperymentalnych, uzyskane wyniki i dyskusja

W pierwszej próbie ściskania elementów konstrukcji modelu zarejestrowane maksymalne obciążenie ściskające wyniosło 2500 N. Uwzględniało ono również dodatkowo obciążenie ciężarem stalowej płyty (33 N) umieszczonej bezpośrednio pod głowicą maszyny i obciążenie zasypem gruntowym (196 N). Przebieg obciążenia w funkcji przemieszczenia przedstawiono na rysunku 3.



**Rys. 3.** Zależność przemieszczenia od obciążenia siłą ściskającą

Zarejestrowana wartość przemieszczenia przy ściskaniu i zarejestrowanym maksymalnym obciążeniu ściskającym wyniosła 21,8 mm. Ocenia się, że dodatkowe obciążenie stalową płytą i obciążenie nierównomiernie rozłożonym zasypem gruntowym, szczególnie warstwy w strefie grzbietowej powłoki, nie wpłynęły w znaczący sposób na określoną ostatecznie wartość przemieszczenia.

Stwierdzono, że w wyniku obciążenia powstało jedno niewielkie zarysowanie (zaznaczone na rysunku 4 strzałką), zlokalizowane w strefie podniebienia powłoki, przy jej bocznej krawędzi. Natomiast nie stwierdzono zmian w zasypie gruntowym.

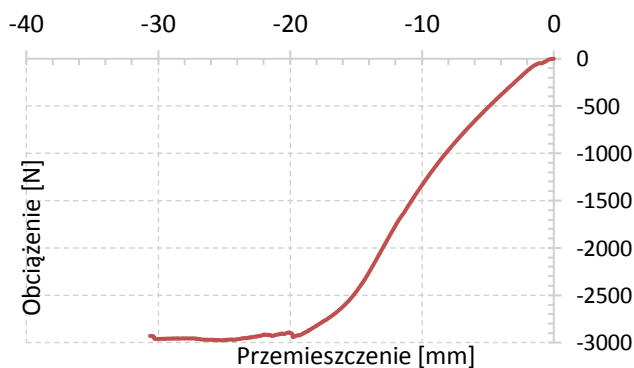


Fot. Jacek Partyka

**Rys. 4.** Zarysowanie (oznaczone strzałką) w strefie wierzchołkowej przy krawędzi powłoki

Następnie poddano model działaniu maksymalnego pionowo skierowanego obciążenia, w celu określenia takiej wartości tego obciążenia ściskającego, przy której spodziewane było wystąpienie widocznych na wewnętrznej powierzchni powłoki modelu uszkodzeń w postaci rys i pęknięć, a także ewentualne zmiany w zasypie gruntowym. Zarejestrowane w tej próbie maksymalne obciążenie ściskające, przy którym widoczne były na wewnętrznej powierzchni powłoki rysy i pęknięcia, a także zmiany w zasypie gruntowym, wyniosło 2975,5 N, a zarejestrowana wartość





**Rys. 5.** Zależność przemieszczenia od maksymalnego obciążenia siłą ściskającą

przemieszczenia przy ściskaniu i maksymalnym obciążeniu ściskającym wyniosła 25,2 mm (rys. 5).

Wartość maksymalnego obciążenia ściskającego uwzględniała również dodatkowo obciążenie ciężarem stalowej płyty umieszczonej bezpośrednio pod głowicą maszyny



**Rys. 6.** Poprzeczne pęknięcia i rozwarstwienia elementów warstw konstrukcyjnych powłoki

**Rys. 7.**  
Pęknięcie krzywoliniowe na powierzchni konstrukcji modułowej w jej dolnej strefie



**Rys. 8.** Przemieszczenie fragmentów zasypu gruntowego z parciem na ściankę zasypu

i obciążenie zasypem gruntowym. Stwierdzono, że w wyniku obciążenia powstały uszkodzenia na wewnętrznej powierzchni powłoki modelu, w postaci nieregularnych pęknięć o krzywoliniowym zarysie i poprzecznych rozwarstwień elementów warstw konstrukcyjnych powłoki, co przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Ponadto stwierdzono zmiany w zasypie gruntowym w postaci rozdziału masy i rozszerzenia objętości tego zasypu, a także przemieszczenia się jego fragmentów z widocznym parciem na jedną ze ścianek ograniczających zasyp gruntowy (rys. 8).

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz uzyskanych wyników, można stwierdzić że:

- niewielkie zarysowanie na powierzchni wewnętrznej powłoki w strefie podniebnej, które pojawiło się w końcowym etapie trwania próby 1, nie wpłynęło na trwałość konstrukcji nośnej modelu i zasypu gruntowego;
- w znacznym zakresie obciążeń (do około 2900 N), zastosowane materiały konstrukcji powłoki modelu, pozostają sprężyste;
- trwałe odkształcenie materiałów konstrukcyjnych powłoki wraz z obszarem płynięcia obejmuje zakres obciążeń od około 2900 N do wartości maksymalnego zarejestrowanego obciążenia ściskającego (2975,5 N) – przypadek 2;
- prawdopodobne obciążenie niszczące, związane z utratą trwałości elementów konstrukcyjnych powłoki oraz odkształceniami zasypu gruntowego, a także niespełnieniem tym samym wymagań techniczno-eksploatacyjnych modelu, może zaistnieć w zakresie obciążeń powyżej wartości 3204,5 N;
- odkształcenia zasypu gruntowego występują w zakresie plastyczności materiałów konstrukcyjnych powłoki tworzącej z tym zasypem układ współpracujący;
- nośność konstrukcji powłokowej może być zwiększona, zgodnie z pracą [15], w przypadku konstrukcji gruntowo-powłokowych poprzez:
  - modyfikowanie parametrów samej powłoki, takich jak: kształt i materiał powłoki (np. zastosowanie materiału o jeszcze

wyższych własnościach wytrzymałościowych) oraz grubości elementów konstrukcji systemowej PwK,  
 – oddziaływanie na parametry zasypki (gruntu), takie jak np.: jakość i rodzaj zastosowanego kruszywa, stopień zagęszczenia zasypki, technologia układania zasypki.  
 Dokładność pomiarów wykonanych podczas eksperymentu była odpowiednia do zastosowanej metody badawczej, a ewentualne błędy pomiarowe w eksperymencie były możliwe do zaakceptowania.

#### 4. Podsumowanie

Zasadniczym wnioskiem z przeprowadzonych badań eksperymentalnych jest to, że elementy konstrukcji powłokowej w przedłożonym do badań modelu piwniczki zachowały trwałość materiałową w czasie badania modelu, przez co uznaje się ich dobór i parametry za właściwe, a także spełniające wymagania minimalnej nośności, założonej przez producenta wyrobu. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych należy stwierdzić, że model piwniczki został zaprojektowany w taki sposób, iż w warunkach przewidywanych obciążeń zostały spełnione kryteria trwałości elementów konstrukcyjnych powłoki walcowej, zapewniającej przystosowanie do użytkowania, zgodnie z przeznaczeniem.

Przeprowadzenie eksperymentu badawczego pozwoliło na uzyskanie zadowalających efektów wynikowych, takich jak maksymalna wartość siły ściskającej i wielkość przemieszczeń.

Uzyskane poprzez badania eksperymentalne wyniki, w wystarczający sposób dla producenta wyrobu, opisują pracę elementów modelu piwniczki. Ponadto należy stwierdzić, że zastosowana metoda przeprowadzenia badań eksperymentalnych oraz otrzymane wyniki, mogą być pomocne w projektowaniu i wykonawstwie innych modeli obiektów producenta, przeznaczonych do eksploatacji.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Pinilla Y., Gómez L., Ospina S., Underground Structures Used for Storage of Perishable Food: State of The Art, *International Journal of Scientific & Technology Research*, tom 9, 2/2020, ISSN 2277-8616
- [2] Lorenc M. W., Podziemia użytkowane i tworzone przez człowieka, Konferencja Naukowo-Techniczna Zabezpieczenie i rewitalizacja podziemnych obiektów zabytkowych, Kraków-Bochnia 21–22 wrzesień 2001 r., str. 43–54, ISBN 83-912116-4-9
- [3] Awrejcewicz J., Adrianov I. V., Płyty i powłoki w przyrodzie, mechanice i w biomechanice, Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2001
- [4] Woźniak Cz., Mechanika sprężystych płyt i powłok, praca zbiorowa pod red. Czesława Woźniaka, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2001
- [5] Romanów F., Wytrzymałość konstrukcji warstwowych, Wydawnictwo WSi, Zielona Góra, 1995
- [6] Djouama M. L., Hamadi D., Temami O., Ayoub A., Khechai A., Effect of boundary conditions and geometry on the failure of cylindrical shell structures, *Engineering Solid Mechanics* 8/2020, str. 313–322
- [7] Romanów F., Wytrzymałość konstrukcji warstwowych, Wydawnictwo WSi, Zielona Góra, 1995.
- [8] Xiangzhong Meng, Xiuhua Shi & Xiangdang Du, Study on Combined shell Mechanics Analysis, *Modern Applied Science*, tom 1, 3/2007, str. 1–6, doi.org/10.5539/mas.v1n3p6
- [9] Kasharina T. P., Results of the Study on the Influence of Shell Structures on their Stability, *Procedia Engineering*, 150, 2016, str. 1811–1816, doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.175
- [10] Mayur S. Vekariya, Er. Ashish H. Makwana, Review on Thin-shell Structures: Advances and Trends, *International Journal of Research Publication and Reviews*, tom 2, 12/2021, str. 1593–1609
- [11] Hajlaoui A., Wali M., Ben Jdidia M., Dammak F., An improved enhanced solid shell element for static and buckling analysis of shell structures, *Mechanics & Industry* tom 17, 5/2016, str. 12, doi.org/10.1051/meca/2015106
- [12] Vinogradov Y., Kashfutdinov B., An analytical solution of boundary problems of shell deformation mechanics, *MATEC Web of Conferences*, tom 362, 2022, XXII International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (CMMASS 2021), doi.org/10.1051/mateconf/202236201032
- [13] Woźniak Cz., Mechanika sprężystych płyt i powłok, praca zbiorowa pod red. Czesława Woźniaka, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2001
- [14] Wysokowski A., Janusz L., Mostowe konstrukcje gruntowo-powłokowe. Laboratoryjne badania niszczące. Awarie w czasie budowy i eksploatacji, XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna Szczecin-Międzyzdroje, 23–26 maja 2007, Awarie budowlane, 2007
- [15] Korusiewicz L., Badania w czasie zasypywania gruntowo-powłokowej konstrukcji o dużej rozpiętości wykonanej bez dodatkowych elementów usztywniających, *Roads and Bridges – Drogi i Mosty* 14, 2015, str. 203–218, doi: 10.7409/rabdim.015.014
- [16] Wysokowski A., Howis J., Wykonawstwo konstrukcji gruntowo-powłokowych ze stalowych blach falistych, cz. 1. Parametry konstrukcyjne powłok stalowych, *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* 2/2017, str. 88–92
- [17] Wysokowski A., Machelski, Howis J., Ekologiczne obiekty gruntowo-powłokowe w budownictwie komunikacyjnym, *Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne*, 2022
- [18] Machelski C., Korusiewicz L., Contact interaction between corrugated steel shell and the soil backfill determined based on the measurements of shell deformations, tom LXVII, ISSUE 1, 2021, str. 1–23, doi.org/10.24425/ace.2021.136461
- [19] Ziegler M., Application of geogrid reinforced constructions: history, recent and future developments, *Procedia Engineering*, 172, 2017, str. 42–51
- [20] Al-Barqawi M., Rawan A., Wane M., Hani T., Elhajjar R., Polymer Geogrids: A Review of Material, Design and Structure Relationships, *Materials (Basel)*, 14(16)202, str. 14745, doi.org/10.3390%2Fma14164745
- [21] Zamara K., Fowmes G., Kawalec J., Geogrid stabilisation application – review of strain measurement methods, research and implications on design approaches, *IOP Conferences Series: Materials Science and Engineering*, tom 1260, 7 th EuroGeo Conference 03/09/2022-07/09/2022 Warsaw, Poland, doi.10.1088/1757-899X/1260/1/012048
- [22] Mustafa A. Y., Mahmoud K. S.2, Zuhair Abd Hacheem, Rasheed M. M., Effect of geogrid on the structural behavior of reinforced concrete beams, 2nd International Conference for Civil Engineering Science (ICES 2021), *Journal of Physics: Conference Series*, 1895 (2021) 012048, doi:10.1088/1742-6596/1895/1/012048
- [23] Gravit M., Kuleshin A., Khametgalieva E., Karakozova I., Technical characteristics of rigid sprayed PUR and PIR foams used in construction industry, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 90 (2017) 012187, doi:10.1088/1755-1315/90/1/012187
- [24] Bashirzadeh R., Gharehbaghi A., An Investigation on Reactivity, Mechanical and Fire Properties of Pu Flexible Foam, *Journal of Cellular Plastics*, 46, 129, 2010, doi: 10.1177/0021955X09350805.
- [25] Chróścielewski J., Rucka M., Witkowski W., Metody doświadczalne w wytrzymałości materiałów, wydanie I, Politechnika Gdańska, 2018
- [26] Głogowska K., Sikora J.W., Właściwości lepko-sprężyste polietylenu małej gęstości oznaczane podczas ściskania, *Politechnika Lubelska, Katedra Procesów Polimerowych, Przetwórstwo Tworzyw*, tom 21, 4(166)2015, str. 324–328
- [27] PN-EN-1993-1-6-2009: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część106: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych
- [28] <https://piwniczkipwk.pl/>, dostęp: 17 października 2023