

dr inż. Grzegorz Kimbar<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0003-0500-4062

mgr inż. Paweł Roszkowski<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-4884-8978

# Oddziaływanie pożaru na stalowe silosy lejowe – pełnowymiarowe badania polowe

## *Fire actions on steel hopper silos – full-scale field tests*

DOI: 10.15199/33.2023.07.07

**Streszczenie.** W 2020 r. przeprowadzono badanie pełnowymiarowego stalowego silosu lejowego (kubatura: 18 m<sup>3</sup>) w warunkach pożarowych. Obciążony silos nagrzewano asymetrycznie za pomocą palników gazowych. Mierzono warunki nagrzewania, warunki otoczenia, prędkość wiatru, temperaturę i przemieszczenia płaszcza silosu aż do wystąpienia awarii obiektu. Silosy lejowe wykazują dużą wrażliwość na pożar zewnętrzny, co ma szczególne znaczenie w kontekście polskich przepisów dotyczących obiektów rolniczych.

**Słowa kluczowe:** silosy; zagrożenia pożarowe; pożar zewnętrzny; badania w pełnej skali.

**Abstract.** In 2020 a test of full-scale steel hopper silo (cubage: 18 m<sup>3</sup>) in fire conditions has been conducted. The loaded silo has been heated asymmetrically with gas burners. Heating conditions, wind conditions, temperature and displacement of the silo has been measured up to the point of the collapse of the structure. The hopper silos exhibit high susceptibility to external fire conditions, which has particular significance in the context of Polish law regarding agricultural structures.

**Keywords:** silos; fire hazards; external fire; full-scale tests.

Stalowe silosy lejowe i płaskodenne są powszechnie wykorzystywane w gospodarstwach rolnych. Są to na tyle istotne budowle rolnicze, że polskie przepisy dotyczące warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki rolnicze [1] zobowiązują do zapewnienia silosom klasy odporności ogniowej minimum R 30, co poruszono w pracy [2]. Prowadzone do tej pory badania naukowe skupiały się głównie na ocenie zagrożeń z uwagi na składowane materiały [3 – 7]. W ostatnich latach w Instytucie Techniki Budowlanej (ITB) badano wpływ zewnętrznych scenariuszy pożarowych. Do tej pory analizowano wpływ składowanych wyrobów rolniczych na temperaturę płaszcza stalowego, a także przeprowadzono kilka badań reprezentujących pożar zewnętrzny silosów płaskodennych w pełnej skali. Były to badania innowacyjne w skali światowej [2, 8]. Potrzeba polowych badań ogniowych wynikała z braku właściwych norm badawczych, na podstawie których można byłoby określić nośność ogniową silosu. Istniejące normatywne procedury badawcze są nieodpowiednie do ustrojów o powłoce rozciąganej (silosy płaskodenne) lub ustrojów złożonych z rozciąganej powłoki i ściskanych słupów (silosy lejowe). Ponadto wymiary silosów bardzo często przekraczają gabaryty typowych pieców do badań, w których ewentualnie można byłoby przeprowadzać badania całej struktury w warunkach laboratoryjnych [9].

Praca mechaniczna silosów lejowych w znacznym stopniu różni się od pracy mechanicznej silosów płaskodennych. Bardziej złożona struktura silosów lejowych w porównaniu z płaskodennymi wprowadza potencjalnie dodatkowe obszary, w których może nastąpić przekroczenie nośności kon-

strukcji. Wspomniane wcześniej badanie silosów płaskodennych umożliwiło określenie zachowania płaszcza silosu przy równomiernym obciążeniu ogniowym konstrukcji [8]. Opisane w tym artykule badanie pozwoliło na uzupełnienie wiedzy o przypadki silosów przy asymetrycznym oddziaływaniu ognia.

### Metoda badania

Do badania wytypowano pełnowymiarowy silos lejowy dostępny w sprzedaży. Uwzględniając wcześniejsze doświadczenia badawcze, zdecydowano się na scenariusz pożaru uwzględniający dwa kryteria: maksymalną moc pożaru 2,1 MW oraz oddziaływanie opisane zależnością temperatura-czas, odpowiadające „krzywej pożaru zewnętrznego”, zdefiniowanej za pomocą równania (1), przyjętej na podstawie [11]. Ograniczenie mocy pożaru wynikało częściowo ze względów praktycznych (nagrzewanie punktowe za pomocą palników propanowych), a częściowo z konieczności ograniczenia oddziaływania do bardziej realistycznych warunków przyczyny pożaru, tj. zapłonu jakiegoś rodzaju materiału organicznego, znajdującego się w pobliżu silosu. Kryterium krzywej pożaru zewnętrznego wprowadzono w celu kontroli tempa jego rozwoju. W praktyce, przy podanej dalej geometrii stanowiska badawczego, elementu próbnego, oddziaływań zewnętrznych (np. wiatru), asymptotyczne osiągnięcie temperatury 680°C, jak wynika z (1), okazało się niemożliwe. Z tego powodu zdecydowano się na zmodyfikowanie zależności (1) przez wprowadzenie dodatkowego parametru  $T_a$  (2). W tym ujęciu zależność (2) należy traktować jedynie jako kryterium tempa rozwoju pożaru, w której rzeczywista wartość graniczna temperatury  $T_a$  wyniknęła z ograniczenia mocy pożaru i została wyznaczona na podstawie danych pomiarowych. Ponadto, analizując budowę i charakter pracy statycz-

<sup>1)</sup> Instytut Techniki Budowlanej

<sup>\*</sup> Adres do korespondencji: g.kimbar@itb.pl

nej silosów lejowych, przyjęto niesymetryczne oddziaływanie pożaru, co zrealizowano przez odpowiednie umiejscowienie palników gazowych, przedstawione na fotografii 1. Przeprowadziliśmy wiele badań na silosach płaskodennych przy oddziaływaniu symetrycznym i jedno przy oddziaływa-



Fot. 1. Element próbny przed (a) i w trakcie (b) badania  
Photo 1. Test specimen prior (a) and during (b) the test

niu asymetrycznym [2, 8]. W przypadku silosu lejowego oddziaływanie asymetryczne uznano za bardziej niekorzystne ze względu na niekorzystny charakter współpracy słupów silosu z płaszczem oraz efekty drugiego rzędu, występujące po deformacji nagrzewanych słupów, skutkującej przemieszczeniem obciążenia.

$$T = 660 \cdot (1 - 0,687 \exp(-0,32t) - 0,313 \exp(-3,8t)) + 20; T [^{\circ}\text{C}], t [\text{min}] \quad (1)$$

$$T = (T_a - 20) \cdot (1 - 0,687 \exp(-0,32t) - 0,313 \exp(-3,8t)) + 20; T [^{\circ}\text{C}], t [\text{min}] \quad (2)$$

gdzie:  $T_a [^{\circ}\text{C}]$  – wartość graniczna (dla  $t \rightarrow \infty$ ) temperatury nagrzewania.

Zbadano jeden lejowy silos stalowy (fotografia 1) o kubaturze 18,7 m<sup>3</sup>, wysokości całkowitej 6,29 m, masie 930 kg i ładowności nominalnej 12,2 t (określonej przez producenta), wsparty na sześciu słupach wykonanych z kształtowników zimnogiętych (przekrój klasy 3) ze stali S220GD+Z o grubości blachy 2,5 mm i usztywnionych za pomocą krzyżulców. Płaszcz silosu składał się z trzech carg, każda o wysokości nominalnej 1,0 m i średnicy 2,48 m, wykonanych z blachy o grubości 1,0 mm (dwie górne cargo) i 1,5 mm (dolna cargo) ze stali S220GD+Z. Dolna cargo połączona była ze słupami na całej swojej wysokości. W dolnej części znajdował się stożkowy lej zsykowy o kącie tworzącej 30° do pionu, który był wsparty na ruszcie połączonym w dolnej części ze słupami. Nad płaszczem znajdowała się stożkowa pokrywa o kącie nachylenia 30° do poziomu. Wszystkie powłoki i pręty silosu były połączone za pomocą śrub stalowych M6 o klasie 8.8. W silosie znajdowały się otwory wysypowe, okna rewizyjne i komin wentylacyjny.

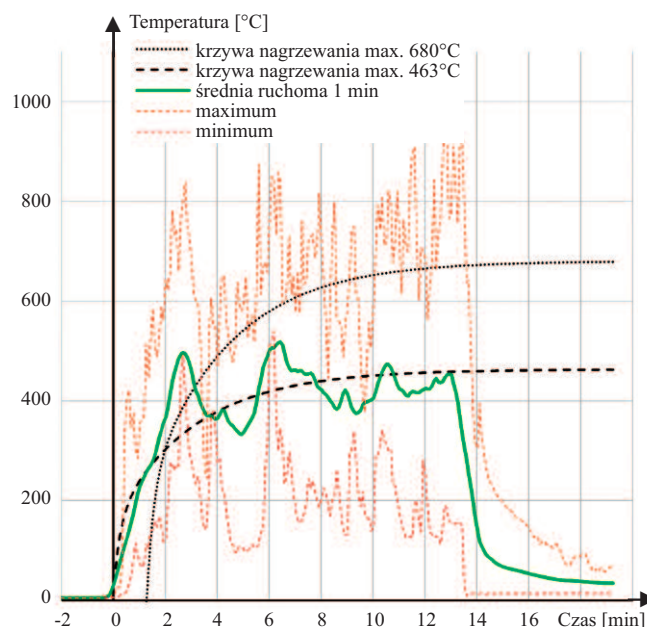
Zdecydowano się na wysokie obciążenie silosu, bliskie granicy nośności. W tym celu silos został w całości wypełniony piaskiem o ciężarze 16,8 kN/m<sup>3</sup> i łącznej masie 34 000 kg. Z obliczeń konstrukcyjnych wynika, że maksymalne naprężenia elementów silosu sięgało 170 MPa. Oddziaływanie ognio-

we wywołano za pomocą sześciu palników piaskowych ustawionych asymetrycznie wokół trzech słupów silosu (fotografia 1), zasilanych i sterowanych parami propanem 95%. Jedną z par palników wyposażono w rotometr do pomiaru przepływu (stanowisko kontrolne), w którym przepływ propanu utrzymywano w przedziale 6,5 – 7,5 dm<sup>3</sup>/s. Górna powierzchnia palników była ustawiona najniższej jak to możliwe, tj. 35 cm nad nominalnym poziomem „zero” (poziom gruntu).

Temperaturę nagrzewania kontrolowano ok. 100 cm nad palnikami. Przebieg temperatury nagrzewania przedstawia rysunek 1. Temperaturę silosu mierzono za pomocą 41 termoelementów typu K rozmieszczonych na słupach, krzyżulcach oraz zewnętrznej powierzchni leja zsykowego. Wartości zarejestrowanej temperatury w momencie awarii pokazano na rysunku 2. Prędkość i kierunek wiatru podczas

badania mierzono anemometrem czasowym, umieszczonym na wysokości 10 m nad poziomem terenu. Średnia prędkość wiatru nie przekraczała 1 m/s, a maksymalne porywy wiatru dochodziły do 3 m/s.

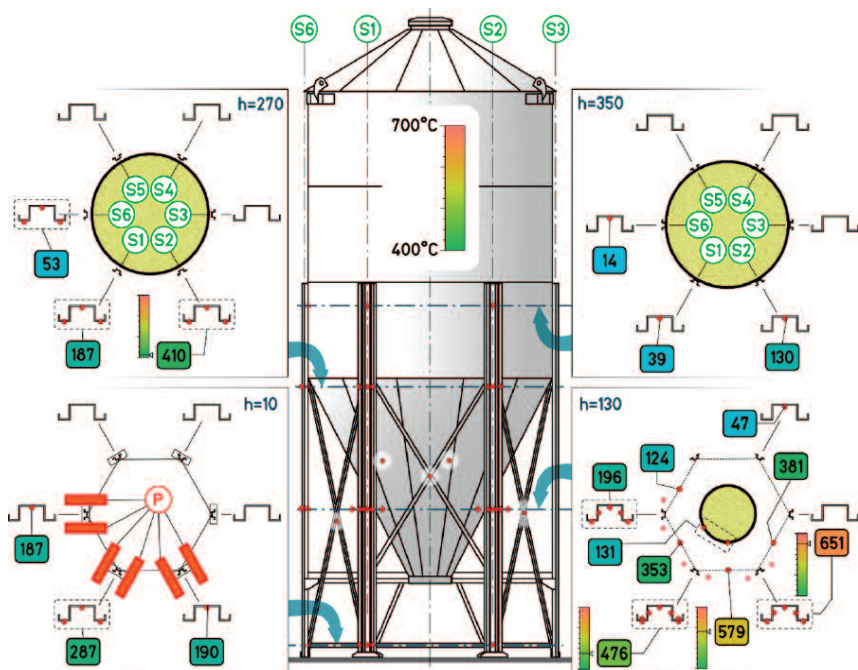
W celu określenia przemieszczeń konstrukcji w trakcie badania zastosowano dwa niezależne systemy: prosty system polegający na umieszczeniu na konstrukcji przymiaru i ob-



Rys. 1. Temperatura nagrzewania elementu próbnego i jej teoretyczne modele

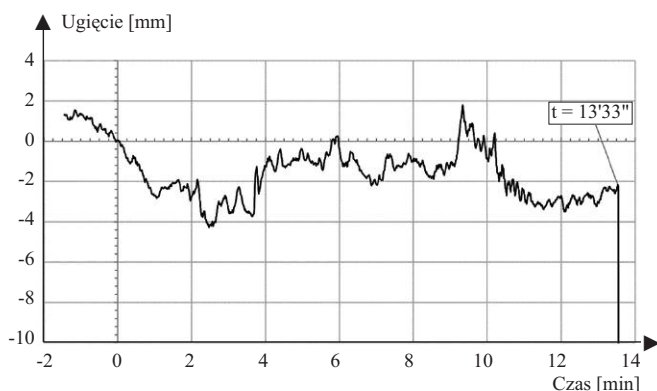
Fig. 1. Test specimen heating temperature and its theoretical models





Rys. 2. Średnia temperatura w momencie awarii  $t = 813$  s  
 Fig. 2. Mean temperature in the moment of collapse  $t = 813$  s

serwacji jego przemieszczenia niwelatorem oraz system fotogrametryczny. Na poszyciu silosu umieszczono siatkę markerów, namalowane czarne pasy (fotografia 1), a wokół silosu (w promieniu ok. 12 m od osi silosu) umieszczono trzy szerokokątne kamery o wysokiej rozdzielczości ( $2704 \times 1520$ ) px rejestrujące obraz z szybkością 119.88 fps. Wzajemne położenie kamer podczas badania zostało ustalone na podstawie położenia stabilnych punktów tła (np. sąsiedniego budynku). Prześlędzono („tracking”) położenie markerów na zapisie wideo i na tej podstawie wyznaczono ich przemieszczenie. Wynik położenia górnej części silosu w pionie przedstawia rysunek 3. Ponadto pilotażowo przeprowadzono skan 3D silosu po badaniu. Udało się uzyskać szczegółowy skan zniszczonego lejka zsywowego (fotografia 2). Rozdzielczość skanu sięga 0,1 mm. Niestety warunki połowe przeprowadzenia skanu oraz charakter powierzchni (blacha ocynkowana) uniemożliwiły wykonanie skanu całego zniszczonego silosu.

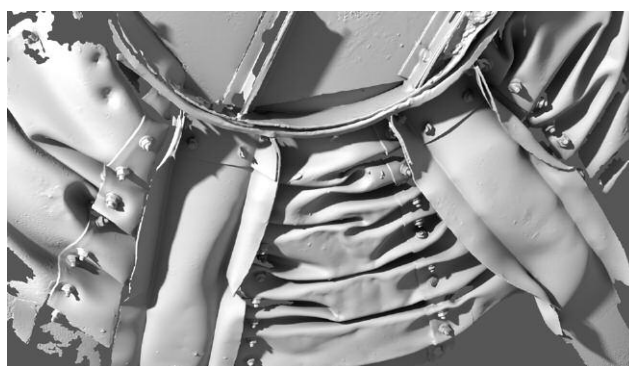


Rys. 3. Przemieszczenie pionowe elementu próbnego  
 Fig. 3. Vertical deflection of the test specimen

## Wyniki badań

Temperatura konstrukcji mierzona była przede wszystkim na nominalnym poziomie pomiarowym 130 cm (24 punkty pomiarowe) na słupach, krzyżulcach i leju zsywowym, a także w pobliżu gruntu (poziom 10 cm, 5 punktów pomiarowych), u szczytu lejka zsywowego (poziom 270 cm, 9 punktów) i u szczytu słupów (poziom 350 cm, 3 punkty). Rozmieszczenie punktów pomiarowych pokazuje rysunek 2.

Konstrukcja uległa awarii w 813 sekundzie nagrzewania (fotografia 3). Mimo dość znacznej mocy nagrzewania (ok. 2,1 MW), utrzymanie warunków nagrzewania było trudne. Interakcja silosu, ognia i wiatru (mimo jego niewielkiej prędkości) sprawiała, że temperatura została poddana znacznym fluktuacjom, co również utrudniało sterowanie mocą pożaru. Jedynie w szczytach temperatury nagrzewanie osiągało założoną maksymalną wartość 680°C. Średnia temperatura na-



Fot. 2. Skan 3D deformacji lejka zsywowego silosu  
 Photo 2. 3D scan of the deformation of silo hopper

grzewania była o ok. 150 K niższa od krzywej zewnętrznej (1). Rzeczywisty przebieg nagrzewania można interpretować także wg krzywej o podobnym przebiegu do krzywej zewnętrznej (1), ale w której maksymalną wartość temperatury (do której krzywa dąży asymptotycznie) obniżono z 680°C do  $T_a = 463$ °C. Wartość  $T_a$  wyznaczono, minimalizując odchylenie kwadratowe temperatury.

Obniżenie temperatury maksymalnej ma uzasadnienie służące prawidłowej interpretacji wyników. Proces uruchamiania palników nie jest zdarzeniem chwilowym – trwa ok. 40 s. Trudno jest zatem ustalić racjonalny moment „początku badania” tylko na podstawie momentu zapłonu. Znacznie bardziej praktycznym podejściem jest dopasowanie założonej krzywej nagrzewania do wyników pomiarów temperatury kontrolnej i w ten sposób znalezienie momentu, który najlepiej odpowiada momentowi początku badania. Ze względu na ograniczoną moc palników, próba regresji wyników pomiarów temperatury przy  $T_a = 680$ °C musi dać nonsensowne wyniki, w których residua regresji wynikają głównie



**Fot. 3. Element próbny w momencie awarii**  
*Photo 3. Test specimen at collapse*

z zniżenia temperatury (średnia z residuów jest ujemna). Model  $T_a = 463^\circ\text{C}$ , choć niestandardowy, znacznie lepiej odpowiada rzeczywistemu przebiegowi doświadczenia, a zatem lepiej też wyznacza nominalny „początek badania”. Zgodnie z tą metodą wyznaczenia czasu początku badania, faktyczny zapłon palników nastąpił pomiędzy  $-24$  sekundą a  $+16$  sekundą badania. Przy regresji krzywą  $680^\circ\text{C}$  jest to odpowiednio od  $-102$  sekundy do  $-62$  sekundy.

W przebiegu deformacji całego silosu nie jest możliwe wskazanie żadnych oznak nadchodzącej awarii. Podczas badania silos ulegał przemieszczeniom (prawdopodobnie częściowo związanym z działaniem wiatru, a częściowo z niepewnością metody pomiarowej), ale bez żadnego widocznego trendu. Oznak należy jednak doszukiwać się w deformacji samych słupów, których przemieszczeń nie mierzono podczas badania.

Średnia temperatura słupa S2 w momencie awarii na wysokości 130 cm osiągnęła wartość ok.  $650^\circ\text{C}$ , a na wysokości 270 cm (u szczyłu leja) ok.  $410^\circ\text{C}$  (rysunek 2). Obliczeniowy wskaźnik wykorzystania nośności, wg obliczeń statycznych, wynosił dla słupów  $\mu_0 = 44\%$ . Zgodnie z [10] temperatura krytyczna w przypadku elementów ze stali węglowej, przy podanym wcześniej  $\mu_0$  i pominięciu zjawisk niestateczności, wynosi  $\theta_{a,cr} = 605^\circ\text{C}$ . W omawianym przypadku nie można wprawdzie pominąć zjawisk niestateczności (wartość  $605^\circ\text{C}$  można więc traktować jedynie jako wartość odniesienia dla temperatury krytycznej), jednak dobra zbieżność wyników oraz fakt, że kierunek zawalenia się silosu w przybliżeniu pokrywał się z kierunkiem słupa S2, wskazuje, że przyczyną awarii była temperatura tego słupa, chociaż mogła nastąpić w konstrukcji pewna redystrybucja naprężeń.

## Wnioski

W przeciwieństwie do przeprowadzonych wcześniej przez nas badań silosów płaskodennych, w badaniu silosu lejowego zaobserwowano awarie ustroju z uwagi na utratę statecz-

ności. Zaobserwowana znaczna deformacja słupów tuż przed awarią była bezpośrednią przyczyną zniszczenia silosu. Pomiar deformacji słupów byłby wskazany, ale dobór odpowiedniej metody pomiaru jest trudny ze względu na działanie płomieni.

Pomimo że nie stwierdzono istotnego wpływu płaszcza i leja silosu na stabilność konstrukcji w warunkach pożarowych, to istnieje potrzeba dalszych badań w celu uproszczenia sposobu określenia nośności silosów bez konieczności badania w pełnej skali. Planuje się weryfikację nośności wyłącznie stężonych słupów. Wyzwaniem jest znalezienia właściwego modelu obciążenia takiego „cząstkowego” elementu próbnego. Ze względu na oddziaływanie wiatru najwyższą temperaturę odnotowano na słupie S2, a nie S1, który znajdował się w „środku pożaru”. Przewrócenie silosu odnotowano na kierunku słupa S2. Trudności w czasie badania skłaniają nas do modyfikacji przyjętej procedury kontroli nagrzewania, przede wszystkim podczas badania silosów lejowych. Jednym ze sposobów jest prowadzenie nagrzewania przez kontrolę wyłącznie mocy pożaru.

Przeprowadzone badanie silosu przy wybranym asymetrycznym oddziaływaniu pożaru o mocy ok. 2,1 MW pokazało, że zaprojektowanie silosu lejowego, który zachowa nośność przez co najmniej 30 min, nie jest prostym zadaniem. Nasuwają się co najmniej dwa pytania. Czy słupy stalowe bez zabezpieczenia ogniochronnego są w stanie przenieść obciążenie przez czas co najmniej 30 min? Czy silosy lejowe w przypadku oddziaływań o mniejszej mocy lub w przypadku innego scenariusza pożarowego są w stanie przenieść obciążenie przez czas 30 min. Na te pytania zamierzamy odpowiedzieć po wykonaniu kolejnych badań.

## Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej z 7 października 1997 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki rolnicze i ich usytuowanie (Dz.Ust. nr 132 poz. 877 z późniejszymi zmianami).
- [2] Roszkowski P, Kimbar G. Zagrożenia pożarowe w silosach rolniczych. Materiały Budowlane. 2018; DOI: 10.15199/33.2018.10.35.
- [3] Persson H. Silo Fires. Swedish Civil Contingencies Agency (MSB), 2013.
- [4] Prusiel JA, Łapko A. Ocena zagrożeń eksplozją pyłów w silosach w świetle norm europejskich. 2011.
- [5] Ogle RA, Dillon SE, Fecke M. Explosion from a smoldering silo fire. Process Saf. Prog. 2014; vol. 33, no. 1: 94 – 103.
- [6] Russo P, De Rosa A, Mazzaro M. Silo explosion from smoldering combustion: a case study. Can. J. Chem. Eng. 2017; vol. 95, no. 9: 1721 – 1729.
- [7] Ramirez Á, Garcia-Torrent J, Tascón A. Experimental determination of self-heating and self-ignition risks associated with the dusts of agricultural materials commonly stored in silos. J. Hazard. Mater. 2010; vol. 175, no. 1–3: 920 – 927.
- [8] Roszkowski P, Kimbar G. Full-scale external fire test of free-standing steel silo. Fire Saf. J. 2020; DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103123.
- [9] CEN, PN-EN 1363-1:2020-07. Badania odporności ogniowej. Część 1: Wymagania ogólne. 2020.
- [10] CEN, PN-EN 1993-1-2:2007 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-2: Reguły ogólne – Obliczanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe. 2007.
- [11] CEN, PN-EN 1991-1-2:2006 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru. 2006.

*Przyjęto do druku: 26.06.2023 r.*