

dr inż. Katarzyna Łaskawiec^{1*)}
 dr inż. Marzena Najduchowska¹⁾
 dr inż. Martyna Strąg²⁾

Odporność balistyczna budowli ochronnych

Zapewnienie odporności balistycznej budowli ochronnych stanowi obecnie jedno z podstawowych wyzwań projektowania infrastruktury ochronnej. Współczesne konflikty zbrojne pokazały, że dominującymi zagrożeniami dla ludności cywilnej są ostrzał z broni małokalibrowej, odłamki amunicji oraz oddziaływanie fali uderzeniowej wywołanej eksplozjami. Doświadczenia z Ukrainy oraz rozwiązania stosowane w państwach NATO, Izraelu, Finlandii i Szwajcarii wskazują, że to właśnie te oddziaływania odpowiadają za większość uszkodzeń infrastruktury ochronnej oraz obrażeń osób przebywających w budynkach [1 ÷ 7].

Z punktu widzenia mechaniki konstrukcji **podstawowe zagrożenia obejmują oddziaływanie: pocisków z broni małokalibrowej; odłamków powstających podczas detonacji amunicji oraz odłamków wtórnych**, będących skutkiem kruszenia betonu i zjawiska rear-face spalling. Szczególnie niebezpieczne są odłamki wtórne, które mogą stanowić zagrożenie w przypadku osób znajdujących się wewnątrz budowli ochronnej nawet przy braku całkowitej perforacji elementu konstrukcyjnego [1 ÷ 6].

W Polsce podstawę prawną projektowania budowli ochronnych stanowi Ustawa z 5 grudnia 2024 r. *o ochronie ludności i obronie cywilnej* [8]. Wymagania określa natomiast Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 4 listopada 2025 r., definiujące kategorie odporności budowli ochronnych oraz wymagania dotyczące ochrony przed ostrzałem z broni małokalibrowej, odłamkami falą uderzeniową. Dokument dopuszcza

również stosowanie układów wielowarstwowych o równoważnej skuteczności ochronnej, stwarzając możliwość wykorzystania nowoczesnych materiałów kompozytowych [9]. Na poziomie międzynarodowym projektowanie budowli ochronnych regulują przede wszystkim dokumenty UFC 3-340-02 oraz TM 5-1300, opisujące metody analizy oddziaływań wybuchowych, perforacji oraz lokalnych mechanizmów zniszczenia elementów betonowych [1 ÷ 6].

Przedstawione uwarunkowania wskazują, że współczesne budowle ochronne powinny zapewniać skuteczną ochronę przed ostrzałem z broni małokalibrowej, oddziaływaniem odłamków oraz skutkami fali uderzeniowej, przy jednoczesnym zachowaniu integralności konstrukcji po oddziaływaniach ekstremalnych. W związku z tym konieczne było **opracowanie odpowiedniej metodyki badań, umożliwiającej wiarygodną ocenę odporności balistycznej elementów budowli ochronnych**.

Celem artykułu jest przedstawienie badań wg takiej metodyki, opracowanej przez Sieć Badawczą Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych we współpracy z Centrum Uzbrojenia i Osłon Balistycznych Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia, poprzedzone analizą współczesnych zagrożeń oraz mechanizmów uszkodzenia betonowych elementów budowli ochronnych.

Mechanizmy uszkodzenia betonowych elementów budowli ochronnych

Ocena odporności balistycznej budowli ochronnych nie ogranicza się do stwierdzenia, czy pocisk lub odłamek przebił element konstrukcyjny. Współczesna inżynieria ochronna uwzględnia cały proces propagacji fal

naprężeń w materiale oraz mechanizmy lokalnego i globalnego uszkodzenia konstrukcji. Zarówno uderzenie pocisku, jak i oddziaływanie wybuchu powodują powstanie krótkotrwałych fal ściskających o dużej amplitudzie, rozchodzących się w betonie z prędkością kilku kilometrów na sekundę. Po dotarciu do swobodnej powierzchni przeciwległej fala ściskająca ulega odbiciu jako fala rozciągająca. Ten etap odpowiada za powstawanie większości uszkodzeń po stronie chronionej konstrukcji ze względu na niewielką wytrzymałość betonu na rozciąganie [1 ÷ 6].

Analiza literatury dotyczącej oddziaływań balistycznych i wybuchowych [1 ÷ 6] wskazuje, że podstawowymi mechanizmami lokalnego zniszczenia betonowych elementów budowli ochronnych są: kraterowanie; penetracja; odpryskiwanie tylnej powierzchni; perforacja oraz wyłamanie czopa betonowego. Mechanizmy te różnią się przebiegiem i skutkami, ale wszystkie wpływają na zdolność elementu do zachowania funkcji ochronnej po oddziaływaniu balistycznym lub wybuchowym.

Pierwszym etapem lokalnego uszkodzenia jest **kraterowanie**, polegające na wykruszeniu betonu po stronie uderzenia wskutek dużych naprężeń ściskających, powstających bezpośrednio w miejscu kontaktu pocisku z elementem. Wielkość krateru zależy od konstrukcji pocisku, jego energii kinetycznej, kąta uderzenia oraz dynamicznej wytrzymałości betonu. Zjawisko to zazwyczaj nie stanowi bezpośredniego zagrożenia w przypadku osób znajdujących się po stronie chronionej, ale inicjuje propagację fal naprężeń odpowiedzialnych za kolejne mechanizmy uszkodzeń [1 ÷ 6].

Kolejnym mechanizmem jest **penetracja**, rozumiana jako zagłębianie się pocisku w materiale bez całkowitego przebiccia elementu. Głębokość penetra-

¹⁾ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych

²⁾ Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

^{*)} Adres do korespondencji:

katarzyna.laskawiec@icimb.lukasiewicz.gov.pl

cji zależy od energii kinetycznej, masy, kształtu i konstrukcji pocisku oraz właściwości materiałowych betonu. W przypadku betonów wysokowytrzymałych jest ona zwykle mniejsza niż w betonach zwykłych, ale duża kruchość materiału może prowadzić do intensywnych uszkodzeń powierzchni tylnej [1 ÷ 6].

Z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkowników najistotniejszym mechanizmem jest **odpryskiwanie tylnej powierzchni**. Zjawisko to występuje, gdy odbita fala rozciągająca przekroczy dynamiczną wytrzymałość betonu na rozciąganie, powodując odrywanie fragmentów betonu od strony chronionej. Powstałe odłamki uzyskują dużą prędkość i stają się wtórnymi pociskami. Mechanizm ten może wystąpić nawet wtedy, gdy pocisk nie przebił całkowicie elementu konstrukcyjnego. Z tego względu ograniczenie odpryskiwania tylnej powierzchni uznawane jest za jedno z podstawowych kryteriów skuteczności budowli ochronnych [1 ÷ 6].

W elementach o niewielkiej grubości może dojść do **perforacji**, czyli całkowitego przebiccia elementu przez pocisk. Oznacza to utratę funkcji ochronnej oraz możliwość bezpośredniego oddziaływania pocisku lub odłamków na osoby znajdujące się po stronie chronionej. Parametrem wykorzystywanym podczas projektowania budowli ochronnych jest granica balistyczna, określająca graniczną prędkość lub energię prowadzącą do perforacji. Przy bardzo dużej energii uderzenia może również wystąpić wyłamanie czopa betonowego, polegające na wypchnięciu stożkowego lub cylindrycznego fragmentu betonu z przeciwległej powierzchni elementu. Mechanizm ten obserwowany jest przede wszystkim w elementach o niewielkiej grubości i może prowadzić do gwałtownej utraty lokalnej nośności [1 ÷ 6].

Oddziaływanie wybuchu różni się od uderzenia pojedynczego pocisku charakterem obciążenia, ale prowadzi do podobnych mechanizmów lokalnego uszkodzenia. Krótkotrwała fala nadciśnienia generuje impuls ściskający, który po odbiciu od tylnej po-

wierzchni powoduje odpryskiwanie betonu, pękanie oraz powstawanie odłamków wtórnych. W przypadku niewielkiej odległości od miejsca eksplozji dominującym mechanizmem zniszczenia są uszkodzenia lokalne, natomiast wraz ze wzrostem odległości coraz większego znaczenia nabierają globalne ugięcia i odpowiedź dynamiczna całej konstrukcji.

Analiza literatury [1 ÷ 6] wskazuje, że rozwój materiałów ochronnych koncentruje się obecnie nie tylko na zwiększaniu odporności na penetrację, lecz przede wszystkim na ograniczaniu odpryskiwania tylnej powierzchni oraz zachowaniu integralności elementów po oddziaływaniu balistycznym lub wybuchowym. Z tego względu skuteczność budowli ochronnych należy oceniać nie tylko przez pryzmat zatrzymania pocisku lub odłamka, lecz również zdolności do ograniczenia powstawania odłamków wtórnych oraz zachowania funkcji ochronnej po oddziaływaniach ekstremalnych [1 ÷ 6]. Przedstawione mechanizmy uszkodzeń stanowią podstawę doboru kryteriów oceny oraz opracowania metodyki badań odporności balistycznej budowli ochronnych.

Założenia metodyki badań odporności balistycznej

Ze względu na brak norm, określających procedury badań balistycznych cywilnych budowli ochronnych, opracowanie metodyki badań wymagało wykorzystania obowiązujących przepisów krajowych oraz uznanych standardów międzynarodowych. W ramach współpracy Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych oraz Centrum Uzbrojenia i Osłon Balistycznych Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia **opracowano metodykę badań stanowiącą podstawę oceny odporności balistycznej elementów budowli ochronnych**. Jej podstawę formalną stanowiło Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 4 listopada 2025 r. *w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle ochronne* [9]. Rozporządzenie określa wymagany poziom ochrony przed ostrzałem z bro-

ni małokalibrowej, oddziaływaniem odłamków amunicji oraz falą uderzeniową, natomiast nie definiuje szczegółowych procedur badań balistycznych, rodzaju stosowanej amunicji, parametrów ostrzału ani kryteriów oceny wyników. W związku z tym opracowanie metodyki wymagało adaptacji uznanych procedur, stosowanych w badaniach balistycznych, umożliwiających wiarygodną ocenę odporności elementów budowli ochronnych.

Przyjęta metodyka zakłada ocenę odporności elementów budowli ochronnych zarówno na oddziaływanie pocisków z broni małokalibrowej, jak i odłamków amunicji. W badaniach zastosowano amunicję kalibru 12,7 × 108 mm z pociskiem B-32, stanowiącą reprezentatywne zagrożenie badanych elementów. Ocenę odporności na oddziaływanie odłamków przeprowadzono z wykorzystaniem standaryzowanego odłamka artyleryjskiego o średnicy 20 mm, symulującego odłamek powstający podczas detonacji amunicji odłamkowo-burzącej. Zastosowany symulator nie odwzorowuje pojedynczego rzeczywistego odłamka, lecz dzięki standaryzowanym parametrom masy, geometrii i prędkości zapewnia powtarzalną oraz porównywalną ocenę odporności balistycznej badanych elementów.

W celu oceny odporności elementów na ostrzał wielokrotny wykonano serię pięciu strzałów w przypadku każdej próbki. Punkty trafienia rozmieszczono w układzie kwadratu – cztery pierwsze strzały oddano w narożach, zachowując odpowiednie odległości pomiędzy miejscami trafień, tak aby uszkodzenia wywołane poszczególnymi uderzeniami nie oddziaływały na siebie wzajemnie. Piąty strzał skierowano w środek wyznaczonego kwadratu, czyli w obszar potencjalnie najbardziej osłabiony wskutek wcześniejszych trafień. Takie rozmieszczenie punktów trafienia umożliwiło ocenę odporności elementu na kolejne uderzenie w strefie kumulacji uszkodzeń i naprężeń powstałych podczas wcześniejszego ostrzału. Identyfikator sekwencji zastosowano zarówno podczas badań z wykorzystaniem amunicji 12,7 × 108 mm, jak i standaryzowanego odłamka artyleryjskiego.



Elementy prefabrykowane po ostrzale amunicją kalibru 12,7 x 108 mm z pociskiem: a) B-32; b, c) symulującym odłamek artyleryjski FSP20 mm

Na podstawie przedstawionych założeń opracowano program badań odporności balistycznej elementów budowli ochronnych.

Badania odporności balistycznej elementów budowli ochronnych

W celu weryfikacji opracowanej metodyki przeprowadzono badania odporności balistycznej betonowych elementów budowli ochronnych, przygotowanych przez Sieć Badawczą Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Badania wykonano w Centrum Uzbrojenia i Osłon Balistycznych Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia. Przedmiot badań stanowiły cztery elementy betonowe o wymiarach $1200 \times 1000 \times 450$ mm, oznaczone jako A, B, C i D. Próbkę A i B poddano badaniom z wykorzystaniem amunicji kalibru 12,7 x 108 mm z pociskiem B-32, natomiast próbki C i D badaniom z zastosowaniem standaryzowanego pocisku symulującego odłamek artyleryjski FSP 20 mm. W każdej z badanych par jedna próbka została wyposażona w dodatkową warstwę zabezpieczającą, natomiast druga stanowiła próbkę odniesienia.

Po zakończeniu badań przeprowadzono ocenę wszystkich próbek, obejmującą analizę stopnia penetracji, charakteru uszkodzeń oraz oględziny powierzch-

ni od strony uderzenia i po stronie przeciwnej. We wszystkich badanych elementach stwierdzono penetrację częściową (PP). Głębokość penetracji wynosiła 6 – 7 cm, przy czym w żadnym z badanych przypadków nie odnotowano całkowitej perforacji elementów. Oględziny powierzchni po stronie przeciwnej nie wykazały występowania odprysków ani innych uszkodzeń świadczących o utracie ciągłości badanych elementów.

Najbardziej wyraźne różnice pomiędzy badanymi wariantami zaobserwowano po stronie uderzenia. W elementach wyposażonych w dodatkową warstwę zabezpieczającą odpryski betonu pozostawały związane z powierzchnią elementu lub były skutecznie zatrzymywane przez zastosowaną warstwę. W próbkach bez dodatkowej warstwy zabezpieczającej obserwowano natomiast odrywanie i rozrzut fragmentów betonu w strefie oddziaływania pocisku lub odłamka. Zjawisko to występowało zarówno podczas badań z wykorzystaniem amunicji kalibru 12,7 x 108 mm z pociskiem B-32, jak i pocisku symulującego odłamek artyleryjski FSP 20 mm.

Przeprowadzone obserwacje potwierdziły przydatność opracowanej metodyki do oceny odporności balistycznej betonowych elementów budowli ochronnych. Jednocześnie wykazały, że zastosowanie dodatkowej warstwy

zabezpieczającej skutecznie ograniczało odrywanie i rozprzestrzenianie odprysków betonu po stronie uderzenia, nie powodując zmian w charakterze uszkodzeń obserwowanych po stronie przeciwnej badanego elementu.

Literatura

- [1] United States Department of Defense. Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-02: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Washington, DC; 2008 (Change 2, 2014).
- [2] Department of the Army. TM 5-1300: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Washington, DC; 1990.
- [3] Smith PD, Hetherington JG. Blast and Ballistic Loading of Structures. Oxford: Butterworth-Heinemann; 1994.
- [4] Baker WE, Cox PA, Westine PS, Kulesz JJ, Strehlow RA. Explosion Hazards and Evaluation. Amsterdam: Elsevier; 1983.
- [5] Mays GC, Smith PD. Blast Effects on Buildings. London: Thomas Telford; 1995.
- [6] Ngo T, Mendis P, Gupta A, Ramsay J. Blast loading and blast effects on structures – an overview. Electronic Journal of Structural Engineering. 2007; 7: 76 – 91.
- [7] Sliepstov O, Malliani S. Comparative Analysis of Architectural and Spatial Solutions for Civil Protection Shelters: The Experience of Ukraine, Finland and Israel. Architectural Bulletin of KNUCA. 2025; 33: 121 – 133.
- [8] Ustawa z 5 grudnia 2024 r. o ochronie ludności i obronie cywilnej. Dz. U. 2024 poz. 1907.
- [9] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 4 listopada 2025 r. w sprawie warunków technicznych dla budowli ochronnych oraz warunków technicznych ich użytkowania i usytuowania. Dz.U. 2025 poz. 1548.

Partner działu:

Łukasiewicz – Instytut Ceramiki
i Materiałów Budowlanych
www.icimb.lukasiewicz.gov.pl

 Łukasiewicz
Instytut Ceramiki
i Materiałów Budowlanych