

mgr inż. Jędrzej Pawłowski

Politechnika Warszawska

dr hab. inż. Tomasz Piotrowski prof. uczelni

Politechnika Warszawska

dr inż. Maja Kępnia

Politechnika Warszawska

dr inż. Bartosz Fikus

Wojskowa Akademia Techniczna

dr inż. Zbigniew Surma

Wojskowa Akademia Techniczna

dr inż. Robert Paszkowski

Wojskowa Akademia Techniczna

dr inż. Szymon Wojciechowski

Pekabex

Betony nowej generacji odporne na obciążenie balistyczne

New generation concrete resistant to ballistic loads

Streszczenie

Celem referatu jest przedstawienie podstawowych mechanizmów związanych ze zjawiskiem oddziaływania pocisków amunicji strzeleckiej, oceny odporności balistycznej betonów, a także prezentacja wyników badań eksperymentalnych. Wskazane zostały również potencjalne kierunki rozwoju w projektowaniu betonów, mogących znaleźć zastosowanie w sektorze obronnym oraz infrastrukturze krytycznej, w tym w energetyce jądrowej.

W referacie omówione zostały podstawowe zagadnienia z zakresu mechaniki uderzenia pocisku w powłokę żelbetową, z uwzględnieniem sposobu propagacji fali odkształceń oraz mechanizmów prowadzących do lokalnego pęknięcia i zniszczenia materiału. Opisane zostały kluczowe zjawiska destrukcyjne towarzyszące uderzeniom, takie jak *scabbing* (oderwanie fragmentów materiału od strony przeciwnej do uderzenia) oraz *spalling* (oderwanie fragmentów materiału od strony uderzenia). Wstępnie scharakteryzowana została odporność betonów na uderzenia pocisku o prędkości między 50 a 1000 m/s, o stosunkowo małej masie względem badanej próbki betonu. Przedstawiony został wpływ zbrojenia rozproszonego oraz wybranych parametrów mechanicznych betonu na jego odporność dynamiczną. Przytoczone zostały również wybrane wzory empiryczne służące do szacowania odporności betonów w funkcji parametrów pocisku i właściwości materiałowych.

Referat zawiera opis metodologii oraz wyniki pierwszego etapu badań dotyczących odporności betonów na uderzenia z prędkościami charakterystycznymi dla pocisków amunicji strzeleckiej. Poza standardową oceną właściwości mechanicznych materiału (m.in. wytrzymałości na ściskanie), przeprowadzone zostały wstępne testy odporności balistycznej przy użyciu pocisków pełnopłaszczowych o prędkości ok. 800 m/s w warunkach laboratoryjnych. Rejestracja przebiegu oddziaływania została przeprowadzona przy użyciu kamery do zdjęć szybkich, a po uderzeniu wykonano skany 3D próbek oraz przeanalizowano

lokalne efekty uderzenia pocisku, takie jak głębokość penetracji oraz średnica krateru. Uzyskane wyniki zostały zestawione z wybranymi modelami empirycznymi.

Rezultaty badań stanowią podstawę do przeprowadzenia szerszych analiz betonów nowej generacji, charakteryzujących się odpornością na obciążenia dynamiczne, oraz do zaplanowania kolejnych etapów badań w kierunku ich praktycznego zastosowania.

Abstract

The aim of the paper is to present the fundamental mechanisms related to the interaction between small-caliber ammunition projectiles and concrete targets, to assess the ballistic resistance of concrete, and to provide experimental findings. Potential development directions for the design of concretes intended for use in the defense sector and critical infrastructure, including nuclear energy facilities, are also indicated.

The paper discusses essential issues in the mechanics of projectile impact on reinforced concrete barriers, taking into account the propagation of deformation waves and the mechanisms leading to local cracking and material failure. Key destructive phenomena accompanying impacts—such as scabbing (detachment of material fragments on the rear side of the target) and spalling (detachment of material from the impact side) are described. The ballistic resistance of concrete subjected to projectile impacts at velocities between 50 and 1000 m/s was preliminarily characterized, with projectiles of relatively low mass compared to the concrete specimen. The influence of fiber reinforcement and selected mechanical properties of concrete on its dynamic resistance is also presented. In addition, selected empirical formulas used to estimate concrete resistance as a function of projectile parameters and material properties are cited.

The paper includes the methodology and results of the first stage of experimental studies concerning the resistance of concrete to projectile impacts at velocities characteristic of small-arms ammunition. In addition to standard testing of mechanical properties (e.g., compressive strength), initial ballistic resistance tests were performed using full metal jacket (FMJ) projectiles at approximately 800 m/s under laboratory conditions. The projectile impact event was recorded using a high-speed camera, and post-impact analyses included 3D scanning of the specimens and evaluation of local effects such as penetration depth and crater diameter. The obtained results were compared with selected empirical models.

The outcomes of the study provide a foundation for further analyses of next-generation concretes designed to resist dynamic loading, and for planning subsequent research stages aimed at practical applications.

1. Wprowadzenie

W związku z rosnącym w Europie i na świecie zagrożeniem terrorystycznym budynki powinny zapewniać bezpieczeństwo ze względu na oddziaływania wyjątkowe wywołane umyślnym działaniem człowieka. Odporność balistyczna przegród żelbetowych oraz odporność na działanie fali uderzeniowej wywołanej wybuchem są podstawowymi wymaganiami do zapewnienia bezpieczeństwa budynku poddanego działaniu broni konwencjonalnej lub narażonego na eksplozję

składowanego materiału np. paliw ciekłych, drobnych materiałów sypkich, materiałów wybuchowych.

Szczególnym zagadnieniem są osłony biologiczne reaktorów jądrowych, które muszą jednocześnie zapewniać bezpieczeństwo reaktora przed wszelkimi oddziaływaniami zewnętrznymi (jednym z rozważanych obciążeń jest uderzenie samolotu zgodnie z RCC-CW [1] oraz równocześnie bezpieczeństwo środowiska zewnętrznego przed szkodliwym promieniowaniem powstałym w wyniku reakcji jądrowej.

Obecnie obserwuje się zwiększenie inwestycji w sektorze wojskowym. Zgodnie z planami na 2025 rok Polska będzie liderem w Europie pod względem inwestycji w wojsko, wydatki przekroczą 200 mld zł z czego 0,15 proc. PKB zostanie przeznaczone na inwestycje w systemy ochrony ludności i obrony cywilnej, w tym w budowę schronów [2]. Inwestycja w pierwszą elektrownię jądrową w Polsce ma rozpocząć się w 2028 roku. [3] Zauważalny jest znaczny wzrost zapotrzebowania rynku Polskiego i Europejskiego na nowe technologie zapewniające bezpieczeństwo w warunkach zagrożenia militarnego i terrorystycznego. Bezpieczeństwo w sektorze jądrowym jest szczególnie ważne ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego regionu oraz bardzo poważne konsekwencje awarii reaktora. Obecnie ponad 20% energii w Europie pochodzi z energetyki jądrowej. [4]

2. Mechanika uderzenia pocisku

Uderzenie obiektu w konstrukcję jest zjawiskiem dynamicznym wywołującym dużą szybkość odkształceń w materiale. Szybkość odkształceń jest pochodną odkształcenia po czasie:

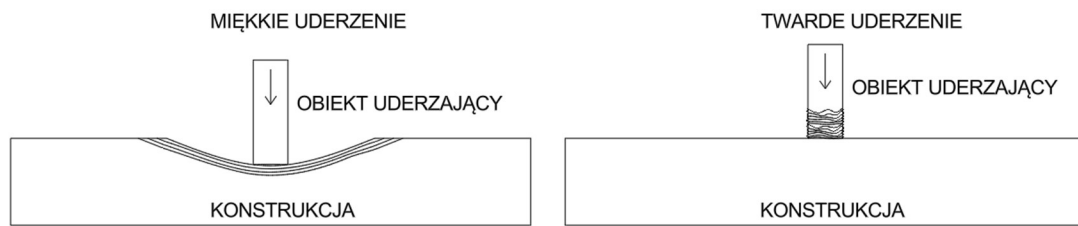
$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1)$$

Obciążenia statyczne najczęściej spotykane w projektowaniu odpowiadają szybkości odkształceń 10^{-5} - 10^{-4} [s⁻¹] i wpływ przebiegu obciążenia w czasie jest pomijalny. W przypadku obciążeń uderzeniem mechanicznym prędkość odkształceń zawiera się w przedziale 10^1 - 10^4 [s⁻¹]. Większe prędkości odkształceń do 10^4 odpowiadają oddziaływaniom fali uderzeniowej wywołanej przez np. materiały wysokoenergetyczne. [5,6]

Oddziaływania uderzenia na konstrukcje zostały opisane w części 1-7 Eurokodu [7]. Eurokod w zakresie uderzenia skupia się na uderzeniach pojazdów mechanicznych (samochodów, pociągów i statków) w szczególności w obiekty infrastrukturalne. Proponowaną metodą obliczeniową jest wykorzystanie równoważnego statycznie obciążenia. Pozwala to na pominięcie dynamicznej analizy uderzenia pojazdu np. w podporę mostową.

Rozróżnione zostają tam dwa podstawowe rodzaje uderzenia:

- Miękkie uderzenie – energia uderzenia jest pochłaniana przez sprężysto-plastyczne deformacje elementów, gdzie równoważne obciążenie statyczne można wyznaczyć z uwzględnieniem zarówno wytrzymałości plastycznej, jak i zdolności do odkształcenia elementów.
- Twarde uderzenie – energia jest rozproszona głównie przez deformację oraz erozję penetratora.



Rysunek 1 Schemat miękkiego i twardego uderzenia w konstrukcję

W analizie uderzenia pocisków rozpatrywane jest miękkie uderzenie. Uwzględniana jest degradacja konstrukcji oraz lokalne efekty zniszczenia.

Zniszczenie materiału lokalnie powodowane jest przez kontakt z pociskiem. Zniszczenie materiału nie mającego bezpośredniego kontaktu z pociskiem powodowane jest przez mechaniczną falę odkształceń wewnątrz materiału.

Uderzenie pocisku generuje falę mechaniczną, która rozchodzi się sferycznie z prędkością fali sprężystej C , którą można obliczyć ze wzoru (2) dla trójwymiarowych ośrodków ciągłych, izotropowych i jednorodnych:

$$C = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Gdzie:

λ – pierwszy parametr Lamégo

μ – drugi parametr Lamégo (moduł ścinania, moduł Kirchhoffa)

ρ – gęstość materiału

W uproszczonych rozważaniach można wykorzystać wzór do obliczania prędkości w zagadnieniach jednowymiarowych (3).

$$C = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Gdzie:

E – moduł sprężystości materiału

ρ – gęstość materiału

2.1 Oddziaływanie pocisku

W analizie uderzenia rozpatruje się pociski odkształcalne oraz nieodkształcalne. Pociski odkształcalne, takie jak wykorzystano w badaniach, są wykonane z miękkim rdzeniem np. ołowiem, stosowane są powszechnie jako podstawowa amunicja strzelecka. Duże pociski odkształcalne wykonane z rur stalowych mogą być stosowane do symulacji uderzenia złożonych obiektów w konstrukcję np. uderzenia samolotu [8].

Pociski nieodkształcalne pozwalają na badanie odpowiedzi konstrukcji bez dokładnej analizy zachowania pocisku. Mogą być stosowane do izolowanych badań materiałowych tarcz oraz efektów działania pocisków przeciwpancernych.

Podstawowymi parametrami pocisków są:

- Prędkość - w badaniach stosowane są prędkości do ok. 100 m/s. Pociski amunicji do broni lufowej mogą osiągać prędkości do 1700 m/s.
- Masa pocisku – najczęściej stosowane są pociski o małej masie rzędu kilku - kilkunastu gramów.

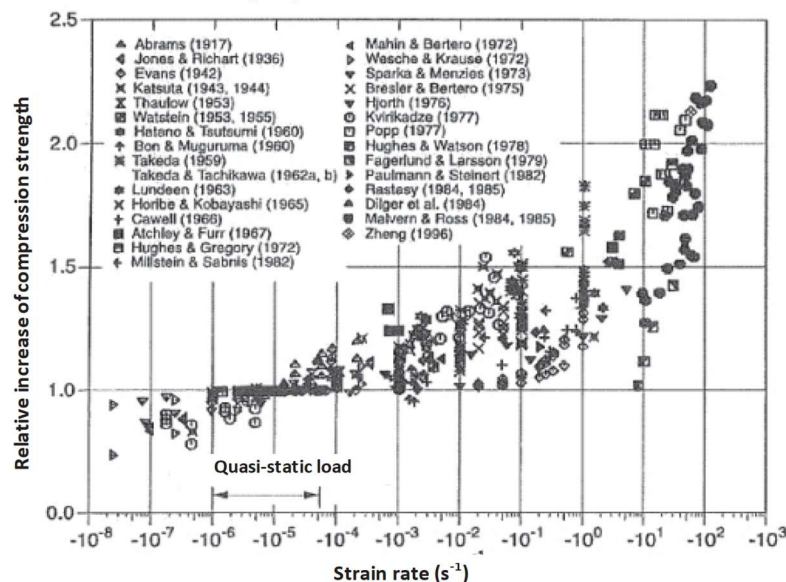
- Kształt pocisku – zależnie od kształtu pocisku inaczej wygląda strefa uplastycznienia materiału w pierwszej fazie kontaktu. Efekt kształtu nieodkształcalnego pocisku był badany przez Young'a [9] oraz Lee [10], badania penetracji pocisków w grunt wykazały że ostry wierzchołek pocisku powoduje przyrost głębokości penetracji do 36% względem wariantu płaskiego i półsferycznego. Badania przeprowadzone przez Barr'a [11] wykazały że płaskie zakończenie pocisku wymaga 30% większej energii do penetracji osłony względem penetratorów z wierzchołkiem półsferycznym.
- Średnica pocisku – głębokość penetracji jest bezpośrednio zależna od średnicy pocisku. Wraz ze spadkiem średnicy pocisku rośnie jego zdolność do penetracji przy tej samej energii kinetycznej, co bezpośrednio wynika ze wzrostu energetycznego obciążenia przekroju obiektu oddziaływania.

2.2 Efekty uderzenia pocisku

Podstawowymi parametrami powłoki żelbetowej które wpływają na odporność na balistyczne oddziaływania są:

- Wytrzymałość na ściskanie betonu. Wraz z pierwiastkiem wytrzymałości betonu na ściskanie wzrasta jego odporność balistyczna.
- Obecność włókien. Dodatek włókien może wpływać pozytywnie na odporność betonu na uderzenie i występowanie różnych efektów oddziaływań.
- Grubość tarczy. Wraz z grubością tarczy wzrasta jej odporność na lokalne efekty oddziaływań oraz wzrasta stateczność ustroju.

Dynamiczna praca betonu powoduje zwiększenie jego wytrzymałości. Wytrzymałość na ściskanie wzrasta ok. 2-krotnie, a wytrzymałość na rozciąganie może wzrastać nawet 8 krotnie. [12]



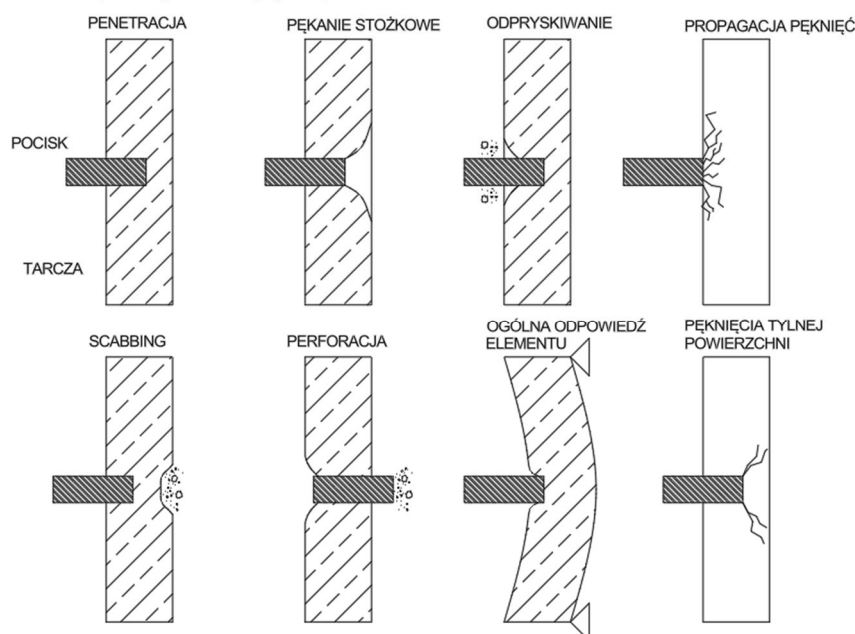
Rysunek 2 Wpływ szybkości odkształcenia na względną wytrzymałość betonu na ściskanie

Uderzenie pocisku zależnie od grubości i wytrzymałości powłoki może wywoływać różne efekty [13,14,15,16]:

- Penetracja to proces, w którym pocisk zagłębia się w tarczę (płyte), nie przebijając jej całkowicie i nie powodując odprysków tylnej strony. Opisywana

jest za pomocą głębokości penetracji (x), która stanowi jeden z najczęstszych wskaźników skuteczności betonu.

- Pękanie stożkowe (ang. cone cracking) to zjawisko, w którym naprężenia ścinające wywołane uderzeniem powodują oderwanie fragmentu w kształcie stożka. Jest to efekt typowy dla materiałów kruchych (np. betonu czy ceramiki).
- Pękanie radialne (ang. radial cracking) to zjawisko powstawania radialnych pęknięć materiału, co jest również typowym wariantem niszczenia materiałów kruchych. Przyczyną powstawania tego typu uszkodzeń jest przekroczenie krytycznej wartości naprężeń rozciągających.
- Odpryskiwanie (ang. spalling) to zjawisko polegające na odrywaniu się fragmentów betonu od strony uderzenia. Pęknięcia promieniowe i ukośne mogą występować po obu stronach przekroju.
- Scabbing to gwałtowne oderwanie masy materiału z tylnej powierzchni.
- Perforacja to całkowite przejście pocisku przez płytę.
- Odpowiedź ogólna celu (tarczy) obejmuje sprężyste odkształcenie tarczy oraz jej konstrukcji wsporczej [17].



Rysunek 3 Efekty oddziaływania pocisku na tarczę

3. Odporność balistyczna betonów

Odporność balistyczną betonów można szacować na podstawie podstawowych cech betonu zbadanych dla obciążania statycznego. Najczęściej wykorzystywanym parametrem do oceny odporności balistycznej jest wytrzymałość betonu na ściskanie. Głębokość penetracji dla betonów zwykłych jest w przybliżeniu proporcjonalna do odwrotności pierwiastka z wytrzymałości betonu na ściskanie. Reira [18] i Hughes [19] w swoich badaniach stwierdzają że parametrem lepiej opisującym to zjawisko jest wytrzymałość betonu na rozciąganie.

Betony wysokowytrzymałościowe (HSC) osiągające wytrzymałość na ściskanie ok. 100MPa zapewnia najbardziej ekonomiczne ich wykorzystanie. Dalszy wzrost

wytrzymałości nie powoduje tak znacznych przyrostów odporności [20]. Użycie HSC powoduje poza wzrostem wytrzymałości redukcję plastyczności betonu. Wykorzystanie włókien podnosi plastyczność, co zapewnia zwiększenie ochrony przed scabbingiem [21], który jest zjawiskiem równie groźnym jak perforacja osłon.

Wykorzystanie zbrojenia rozproszonego ogranicza propagację pęknięć oraz lokalną strefę oddziaływania uderzenia.[22] Wykorzystanie włókien stalowych zmniejsza propagację pęknięć i wymiar krateru ale nie przekłada się znacznie na redukcję głębokości penetracji betonu [23]. Badania Zhang'a [24] prezentują, że nawet mała ilość włókien redukuje propagację pęknięć jeżeli włókna są zdolne do ich mostkowania oraz utrzymania zwartej struktury betonu. Ram-akrishamn [25] w swoich badaniach odnotował, że wykorzystanie włókien o haczykowatych końcach zapewnia nawet 5. krotny wzrost odporności dla uderzeń o niskiej prędkości względem betonu zwykłego. Williamson [26] badając odporność na oddziaływania fali uderzeniowej odnotował, że zastosowanie włókien redukuje fragmentację o 20% oraz prędkość odłamków do 80%.

4. Metody obliczania odporności betonów na uderzenie pocisku

Dostępnych jest wiele metod szacowania głębokości penetracji. Posiadają one wiele cech wspólnych. Większość z nich uzależnia stosunek głębokości penetracji do średnicy pocisku od prędkości pocisku, masy pocisku i wytrzymałości betonu na ściskanie. Wytrzymałość na ściskanie określana jest na standardowych próbkach walcowych [27].

Zmodyfikowany wzór Petry'ego [14]:

$$\frac{x}{d} = K \left(\frac{M}{d^3} \right) \log_{10} \left(1 + \frac{V^2}{19,974} \right) \quad (4)$$

$K = 6.36 \cdot 10^{-4}$ dla betonów niezbrojonych, $K = 3.39 \cdot 10^{-4}$ dla normlanego zbrojenia, $K = 2.26 \cdot 10^{-4}$ dla specjalnego zbrojenia betonu

Modyfikowane równanie Laboratorium Badań Balistyki (The modified Ballistic Research Laboratory BRL formula) [14]

$$\frac{x}{d} = \frac{1.33 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{f_c}} \left(\frac{M}{d^3} \right) d^{0.2} V^{1.33} \quad (5)$$

Równanie inżynierskiego korpusu armii USA (The U.S. Army Corps of Engineers) (ACE) formula [14]

Równanie jest stosowane dla betonów o wytrzymałości na ściskanie poniżej 50MPa oraz prędkości pocisku poniżej 200m/s. [27]

$$\frac{x}{d} = 3.5 \cdot 10^{-4} \frac{MV^{1.5}}{\sqrt{f_c} d^{2.785}} + 0.5 \quad (6)$$

Modyfikowane równanie Narodowego Komitetu Badań Obronnych (The modified formula of the National Defense Research Committee) (NDRC) [14]

Równanie zostało opracowane dla małych średnic oraz lekkich pocisków o prędkości od 152 do 500m/s.[27]

$$G \left(\frac{x}{d} \right) = 3.8 \cdot 10^{-5} \frac{NM}{\sqrt{f_c} d} \left(\frac{V}{d} \right)^{1.8} \quad (7)$$

$$\frac{x}{d} = \begin{cases} 2\sqrt{G} & \text{for } \frac{x}{d} \leq 2.0 \\ 1 + G & \text{for } \frac{x}{d} > 2.0 \end{cases} \quad (8)$$

Gdzie:

- x głębokość penetracji (m)
 d średnica pocisku (m)
 M masa pocisku (kg)
 f_c wytrzymałość betonu na ściskanie (MPa)
 N współczynnik kształtu pocisku
 V prędkość pocisku (m/s).

5. Opis przeprowadzonych badań

5.1 Metodologia badawcza

Badanie wytrzymałości betonu pod obciążeniem dynamicznym bada się za pomocą układu dzielonego pręta Hopkinsona (SHPB). Badania przeprowadza się na próbkach walcowych dostosowanych do średnicy prętów (wymuszającego oraz odbiorczego). Do badań betonu wystarczające są próbki o średnicy 40 mm oraz długości 40 mm. W przypadku zastosowania kruszyw frakcji powyżej 16 mm zasadne może być wykorzystanie próbek o większej średnicy i dostosowanej do nich aparatury. Badania odporności balistycznej betonu nie są unormowane. Metody badawcze bazują na wykorzystaniu energii kinetycznej obiektu o różnym kształcie, masie, strukturze i prędkości.

Test swobodnego spadku młota oraz test swobodnego spadku kuli stalowej pozwala na osiągnięcie szybkości odkształceń na poziomie 10^0 - 10^1 s⁻¹ [28,29]. Test uderzenia pocisku z wykorzystaniem działa gazowego lub broni konwencjonalnej pozwalają otrzymać prędkości odkształceń dochodzące do 10^4 s⁻¹. Analiza wyników badań różni się w zależności od wybranej metody badawczej ale kluczowymi wynikami pozwalającymi na określenie odporności betonów są głębokość penetracji, średnica stożka odłamu, objętość powstałego krateru czy wystąpienie zjawisk towarzyszących np. scabbing.

Przeprowadzone badania stanowiły podstawę do weryfikacji metody badawczej i przygotowania stanowisk roboczych. Stanowią one badania wstępne do prowadzonych badań odporności balistycznej betonów ciężkich i zbrojenia rozproszonego włóknami różnego rodzaju.

Betony badano po 35 dniach. Przygotowano 2 składy betonów w celu kalibracji stanowisk badawczych. Przeprowadzono badanie modułu sprężystości na próbkach walcowych 150x300 mm, badanie wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie metodą brazylijską na próbkach sześciennych o wymiarach 150x150x150 mm.

Tabela 1 Tabela składów przygotowanych mieszanek betonowych

SKŁAD [kg/m ³]	S_0_1	S_0_2
CEMENT	380	375

WODA	152	169
KRUSZYWO DROBNE 0-2	750	696
KRUSZYWO FRAKCJI 8-16	1345	1186
KRUSZYWO FRAKCJI 2-8	538	715
W/C [bezwymiarowe]	0.40	0.45

5.2 Badania odporności balistycznej

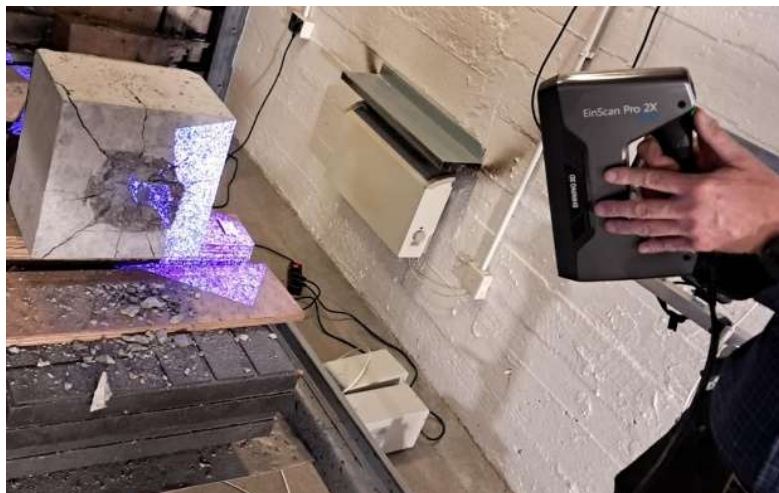
Przygotowano próbki niezbrojone o wymiarach 200x200x120 mm. Próbki umieszczono w osłonie zapobiegającej rozprzestrzenianiu się odłamków i zamocowano podpierając tylną powierzchnię kozłem oporowym z kątowników. Od przodu zabezpieczono próbkę blachą mocującą z oknem przelotowym. Mocowanie próbki uniemożliwiło jej swobodne przemieszczenie pod wpływem uderzenia pocisku. Badanie przeprowadzono w Laboratorium Artylerii i Balistyki Wojskowej Akademii Technicznej.

Próbki betonowe zostały poddane obciążeniu pełnopłaszczowym pociskiem amunicji 7,62x51 mm z rdzeniem ołowianym o masie ok. 9,45 g.



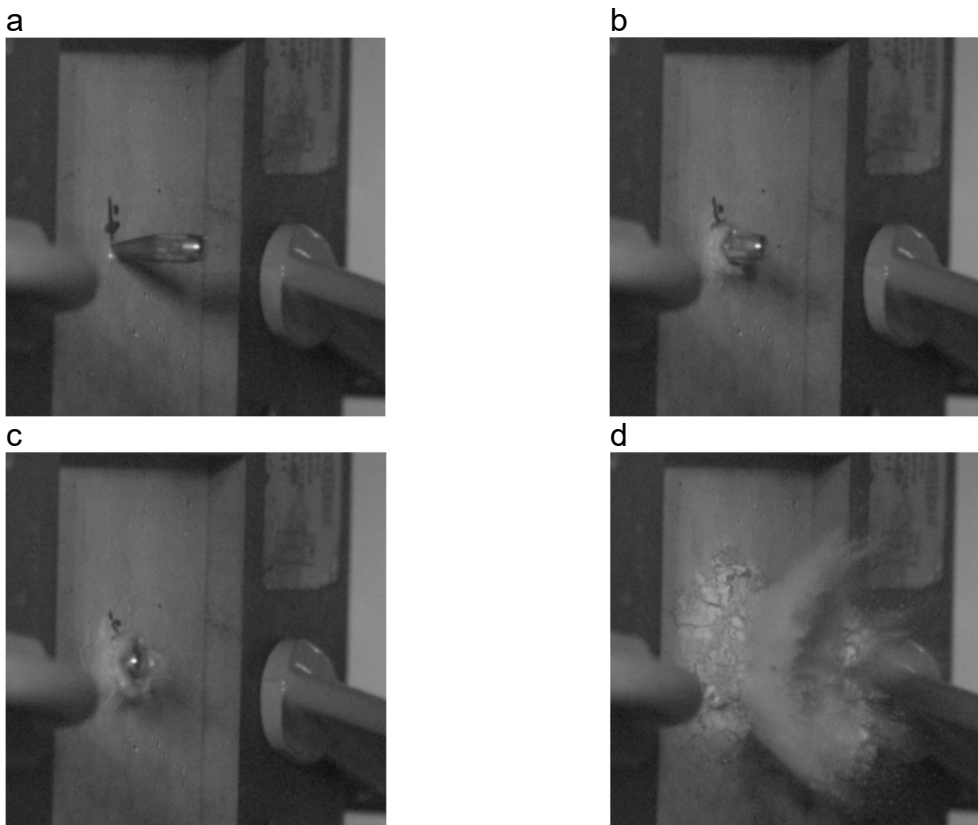
Fotografia 1 Próbka w osłonie balistycznej

Przebieg uderzenia był rejestrowany przez dwie kamery szybkie rejestrujące obraz z szybkością 200 000 kl./s. Próbki po strzale skanowano z wykorzystaniem skanera EinScan Pro 2X Plus w celu otrzymania modelu 3D krateru.



Fotografia 2 Wykonywanie skanu 3D próbki z wykorzystaniem skanera EinScan Pro 2X Plus

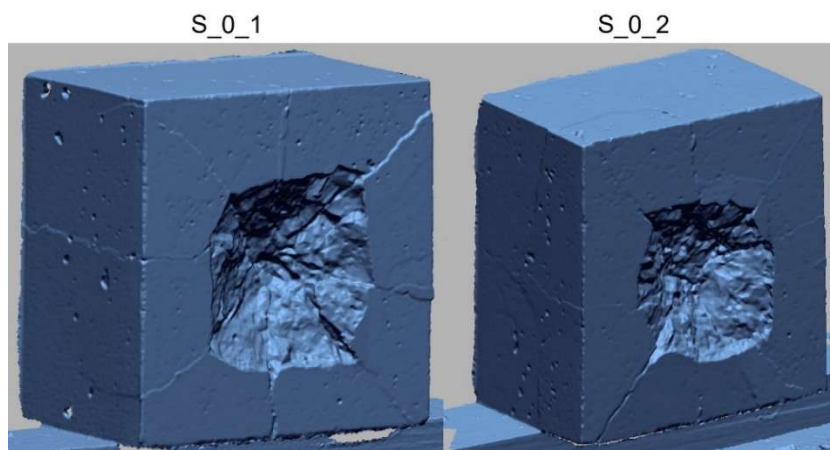
6. Wyniki badań



Fotografia 3 Przykładowe kadry zarejestrowane podczas uderzenia pocisku w próbkę wykonaną z materiału S_0_1 (a – 0 μ s; b – 14 μ s; c – 21 μ s; d – 140 μ s)

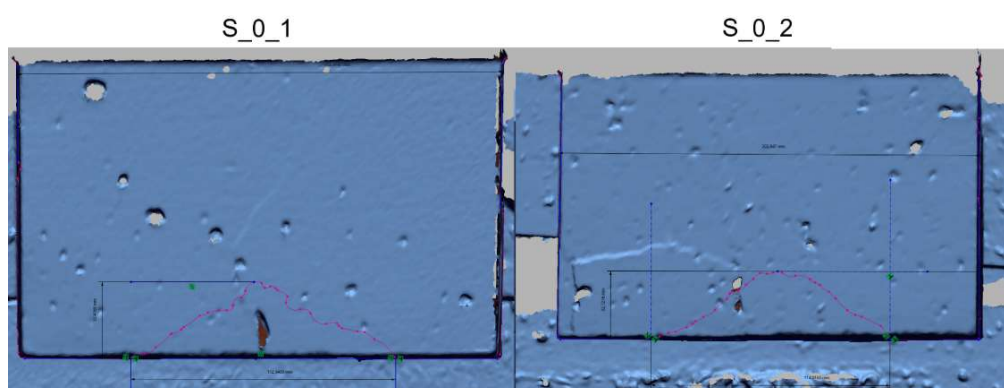
Moment uderzenia i wbicia pocisku w próbkę jest dobrze widoczny, późniejszy rozwój stożka odłamu jest niewidoczny przez dużą liczbę odłamków i pyłu powstałego w

wyniku uderzenia. Pomiarów dokonano z wykorzystaniem analizy modeli 3D. Na rys. 4 przedstawiono skany 3D próbek S_0_1 oraz S_0_2.



Rysunek 4 Skany 3D badanych próbek

Na podstawie skanów 3D pomierzono głębokość penetracji pocisków.



Rysunek 5 Przekroje w miejscu wystąpienia największej głębokości penetracji wraz z widokiem na powierzchnię próbki

W tabeli [2] zestawiono wyniki badań wytrzymałościowych oraz balistycznych.

Tabela 2 Wyniki badań

Badana właściwość	S_0_1	S_0_2
Wytrzymałość betonu na ściskanie [MPa]	47.65	52.67
Wytrzymałość betonu na rozciąganie [MPa]	4.72	4.34
Moduł sprężystości [GPa]	47	42
Gęstość [kg/m ³]	2422	2383
Masa pocisku [g]	9,45	9,45
Prędkość pocisku [m/s]	830	830
Energia kinetyczna [kJ]	3.25	3.25
Głębokość penetracji [mm]	32.4	32.7
Średnica stożka wyłamu [mm]	112.3	114.9

Porównanie wyników badań głębokości penetracji z obliczeniami wybranymi metodami zestawiono w tabeli [3].

Tabela 3 Porównanie wyników badań i obliczeń głębokości penetracji, x [mm]

Metoda	S_0_1 [mm]	Różnica względem eksperymentu [%]	S_0_2 [mm]	Różnica względem eksperymentu [%]
eksperyment	32.4	0	32.7	0
Petry	556.6	1618	556.6	1602
Ballistic Research Laboratory	105.1	224	99.9	206
ACE	84.0	159	80.0	145
Whiffen	112.8	248	105.9	224
NDRC	87.6	170	83.6	156
Ammann and Whitney	110.9	242	105.5	222
IRS	4.0	-88	3.9	-88
Haldare and Hamieh formula	103.4	219	94.3	188
UKAEA	87.2	169	83.2	155

6.1 Wnioski

Wytrzymałości na ściskanie betonów S_0_1 oraz S_0_2 różniły się o ok. 9.5%. Głębokość penetracji w uproszczeniu jest zależna od pierwiastka wytrzymałości na ściskanie. Różnica pierwiastków wytrzymałości wynosiła ok. 5% co przekłada się na bardzo zbliżone głębokości penetracji. Duże różnice między eksperymentem oraz wybranymi metodami wynikają z ograniczonego zakresu stosowalności metod pomiarowych oraz plastycznego odkształcenia pocisku, które pochłonęło dużą część energii uderzenia.

Oględziny stożka wyłomu (krateru) wykazały że przyjęty rozmiar próbki oraz okna blachy mocującej, dla występujących podczas badań energii pocisku, blokują wzrost stożka.



Fotografia 4 Wpływ mocowania próbki na kształt stożka wyłomu. Wskazane proste krawędzie wynikają z zablokowania tworzenia się krateru przez blachę mocującą

Przeprowadzone badania wstępne stanowią podstawę do przeprowadzenia badań nad wpływem zastosowania zbrojenia rozproszonego na odporność balistyczną betonów. Analizie należy również poddać betony ciężkie. Uprozczone obliczenia nie odnoszą się do gęstości betonu, a wzrost gęstości i związana z nim zmiana prędkości rozchodzenia się fali mechanicznej oraz dyssypacji energii może w znaczny sposób wpłynąć na zachowania betonu poddanego obciążeniom balistycznym. Uprozczone metody nie uwzględniają wytrzymałości na rozciąganie (szczególnie rozciąganie przy rozłupywaniu), modułu sprężystości elementu oraz współczynnika Poissona. Wymagane są dodatkowe badania sprawdzające wpływ tych parametrów na odporność balistyczną betonów. Ze względu na niedostosowanie wzorów uproszczonych do prędkości pocisków powyżej 800 m/s oraz odkształcalności pocisków wymagane są dodatkowe badania analizujące prędkość i rodzaj pocisku amunicji strzeleckiej.

7. Podziękowania

Praca została dofinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu nr UGB 22-047/2025/WAT oraz grantu badawczego 2025 r. wspierającego prowadzenie działalności naukowej w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport pt. „Nowej generacji betony osłonowe z uwagi na oddziaływania balistyczne”.

8. Literatura

- 1 RCC-CW 2015 Edition French Association for Design, Construction, and In Service Inspection Rules for Nuclear Island Components
- 2 <https://www.money.pl/gospodarka/rekordowe-inwestycje-w-armie-polska-zostanie-liderem-nato-7127327470242592a.html>
- 3 <https://fakty.tvn24.pl/zobacz-fakty/rzad-stawia-kolejne-kroki-na-drozdze-do-budowy-elektrowni-atomowej-jestesmy-mocno-spoznieni-st8282125>
- 4 <https://www.consilium.europa.eu/pl/infographics/how-is-eu-electricity-produced-and-sold/>
- 5 Solomon Abebe, Tesfaye Alemu Mohammed Review Article Structures under Synergetic Effects of Combined Blast and Impact Loads: A State-of-the-Art Review Hindawi Advances in Civil Engineering Volume 2022, Article ID 6934078, 30 pages
- 6 John L. Provis M&S Highlight: Bischoff and Perry (1991), Compressive behaviour of concrete at high strain rates Materials and Structures (2022) 55:70
- 7 Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcje Część 1-7: Oddziaływania ogólne Oddziaływania wyjątkowe
- 8 Arja Saarenheimo, Kim Calonius and Markku Tuomala BENDING AND PUNCHING STUDIES ON IMPACT LOADED PLATE Transactions, SMiRT-23 Manchester, United Kingdom - August 10-14, 2015
- 9 Young CW. Depth prediction for earth-penetrating projectiles. J Soil Mech Found Division 1969;95(3):803–17
- 10 Lee S, et al. Strain behavior of concrete panels subjected to different nose shapes of projectile impact. Materials 2018;11(3):409
- 11 Barr P. Guidelines for the design and assessment of concrete structures subjected to impact. UKAEA Safety and Reliability Directorate; 1987

- 12 Safety Reports Series No. 87 Safety Aspects of Nuclear Power Plants in Human Induced External Events: Assessment of Structures INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2018 (5-7, 48-55)
- 13 Corbett GG, Reid SR, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: a review. *Int J Impact Eng* 1996;18:141e230
- 14 Li QM, Reid SR, Wen HM, Telford AR. Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *Int J Impact Eng* 2005;32:224e84
- 15 R. P. Kennedy, A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. *Nuclear Engng and Design*, Vol. 37, 183-203 (1976).
- 16 Mohamed Abdel-Kader, Ahmed Fouda Effect of reinforcement on the response of concrete panels to impact of hard projectiles
- 17 A. Rama Chandra Murthy*, G.S. Palani, and Nagesh R. Iyer Impact Analysis of Concrete Structural Components (Review Paper) *Defence Science Journal*, Vol. 60, No. 3, May 2010, pp. 307-319
- 18 Riera JD. Penetration, scabbing and perforation of concrete structure hit by solid missile. *Nucl Eng Des* 1989;115:121e31
- 19 Hughes G. Hard missile impact on reinforced concrete. *Nucl Eng Des* 1984;77(1):23e35
- 20 M.H. Zhang, et al. Resistance of high-strength concrete to projectile impact *Int J Impact Eng*, 31 (7) (2005), pp. 825-841
- 21 S. M. Uzumeri R. Basset, Behavior of high strength concrete members. *Utilization of High Strength Concrete*. Tapir Publishers, 237 – 248 (1987).
- 22 Malvern LE, Jenkins DA, Tang T, Ross CA. Dynamic compressive testing of concrete. *Proceedings of Second Symposium on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures*. Florida: U.S. Dept. of Defense, 1985. p. 194–9.
- 23 Jonas, W., et al., Experimental investigations to determine the kinetic ultimate bearing capacity of reinforced concrete slabs subject to deformable missiles. 1979.
- 24 Zhang MH, Sharif MSH, Lu G. Impact resistance of high-strength fiber-reinforced concrete. *Mag Concr Res* 2007;59(3):199e210.
- 25 Ramakrishnan V, Coyle WV, Fowler LJ, Schrader EK. A comparative evaluation of fiber shotcretes. Report SDSM&T-CBS 7902. USA: Civil Engineering Department, South Dakota School of Mines and Technology; 1979.
- 26 Williamson, G. R. Use of fibrous concrete in structures exposed to explosive hazards. Cincinnati: U.S. Corps of Engineers, Ohio River Division Laboratories: 1965.
- 27 Tarek H. Almusallam, Nadeem A. Siddiqui, Rizwan A. Iqbal, Husain Abbas Response of hybrid-fiber reinforced concrete slabs to hard projectile impact *International Journal of Impact Engineering* 58 (2013) 17e30
- 28 P. B. Murnal, R. N. Chatorikar IMPACT RESISTANCE OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology* eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308
- 29 Doo-Yeol Yooa,*, Nemkumar Banthia Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review *Cement and Concrete Composites* 104 (2019) 103389