

dr hab. inż. Volodymyr Sakharov, prof. UZ^{1)*}

ORCID: 0000-0002-9381-3283

PhD Oleksandr Lytvyn²⁾

ORCID: 0000-0002-2818-3457

Analysis of the resistance of a kinetic shield for an energy infrastructure

Analiza odporności osłony kinetycznej infrastruktury energetycznej

DOI: 10.15199/33.2026.09.04

Abstract. An analysis of the resistance of a kinetic shield for energy infrastructure subjected to impact loads caused by flying objects (drones) is presented. The study includes numerical simulations performed in the Abaqus/Explicit environment, considering nonlinear material properties and contact phenomena. The analyzed shield takes the form of a ring net with a 4-in-1 weave (four rings around one central ring) made of steel wire. The response of the structure to kinetic loads was evaluated, and the minimum installation distance of the shield from the protective structure was determined. The results indicate the high effectiveness of the proposed solution and the possibility of its application for the protection of energy infrastructure under crisis conditions.

Keywords: kinetic shields; 4-in-1 weave; energy infrastructure; UAV; Johnson–Cook; Explicit; contact.

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę odporności osłony kinetycznej infrastruktury energetycznej na obciążenia uderowe wywołane przez obiekty latające (drony). Badania obejmowały symulacje numeryczne przeprowadzone w środowisku Abaqus/Explicit z uwzględnieniem nieliniowych właściwości materiałów oraz zjawisk kontaktowych. Analizowana osłona ma postać splotu pierścieni połączonych w układzie 4-1 (cztery pierścienie wokół jednego pierścienia centralnego), wykonanych z drutu stalowego. Oceniono odpowiedź konstrukcji na obciążenia kinetyczne oraz wyznaczono minimalną odległość montażu osłony od konstrukcji ochronnej. Uzyskane wyniki wskazują na dużą skuteczność zaproponowanego rozwiązania oraz możliwość jego zastosowania do ochrony infrastruktury energetycznej w warunkach kryzysowych.

Słowa kluczowe: osłony kinetyczne; splot 4-1; infrastruktura energetyczna; UAV, Johnson–Cook; Explicit; kontakt.

Under current geopolitical conditions, the protection of civilian energy infrastructure is of particular importance. The experience of the conflict in Ukraine and the conflicts in the Middle East shows that unmanned aerial vehicles (UAVs, loitering munitions) are increasingly used in attacks on critical infrastructure facilities such as power plants and transformer substations. The development of cheap and widely available drone technologies increases the kinetic and explosive threat, which necessitates the search for economical, passive protection systems that are easy to implement in existing infrastructure, including anti-drone nets and screens. The first attempts to use such protective systems were recorded as early as 1917 [1], when net systems with barrage balloons (so-called aprons) were introduced to defend London. These structures, consisting of several balloons connected by a cable with hanging wires, effectively forced German bombers to fly at higher altitudes and reduced the accuracy of their raids. Today, solutions of this type are increasingly used in war zones [2 ÷ 4], constituting one of the relatively inexpensive and effective passive solutions enabling the physical interception of objects or forcing detonation at a safe distance from the protected facility.

W obecnych warunkach geopolitycznych ochrona cywilnej infrastruktury energetycznej nabiera szczególnego znaczenia. Doświadczenia z konfliktu w Ukrainie oraz na Bliskim Wschodzie pokazują, że do ataków na obiekty infrastruktury krytycznej, takich jak elektrownie i podstacje transformatorowe, coraz częściej wykorzystywane są bezałogowe statki powietrzne (UAV, amunicja krążąca). Rozwój tanich i powszechnie dostępnych technologii dronowych zwiększa zagrożenie kinetyczne i wybuchowe, co wymusza poszukiwanie ekonomicznych, pasywnych systemów ochrony, łatwych do wdrożenia w istniejącej infrastrukturze, do których można zaliczyć siatki i ekrany przeciwdronowe. Pierwsze próby wykorzystania takich systemów ochronnych odnotowano w 1917 r. [1], gdy systemy sieciowe z balonami zaporowymi (tzw. fartuchy) zostały wprowadzone do obrony Londynu. Konstrukcje składające się z kilku balonów połączonych liną ze zwisającymi drutami skutecznie zmuszały niemieckie bombowce do lotu na większej wysokości i zmniejszały celność ich nalotów. Współcześnie rozwiązania tego typu są coraz częściej wykorzystywane w strefach wojennych [2 ÷ 4], stanowiąc jedno z relatywnie tanich i skutecznych pasywnych rozwiązań umożliwiających fizyczne przechwycenie obiektów lub wymuszenie detonacji w bezpiecznej odległości od chronionego obiektu.

Wdrażanie tego typu technologii jest coraz częściej rozważane również w odniesieniu do obiektów cywilnych w celu zapewnienia ochrony przed atakami terrorystycznymi z powietrza. Literatura naukowa i techniczna dotycząca siatek przeciwdrono-

¹⁾ Uniwersytet Zielonogórski; Instytut Budownictwa

²⁾ Kijowski Narodowy Uniwersytet Budownictwa i Architektury (Ukraina)

^{*}) Correspondence address: v.sakharov@ib.uz.zgora.pl

The implementation of this type of technology is also increasingly being considered for civilian facilities to provide protection against terrorist attacks from the air. The scientific and technical literature on anti-drone nets intended for civilian facilities is still relatively modest, reflecting the relative novelty of this threat on a mass scale. Existing solutions are based mainly on woven metal or polymer nets installed as perimeter barriers or shields over key facilities. Their mechanism of operation consists in absorbing kinetic energy through controlled deformation of the net, redistribution of forces along cables or rings, and lengthening of the braking distance of the object. In addition, such structures can force the detonation of a charge at a greater distance from the protected facility, limiting the effects of the blast wave and fragments [5].

In geotechnical engineering, solutions designed to absorb kinetic loads have been used successfully for many years. This applies primarily to rockfall barriers, which can be adapted for anti-drone protection. Various companies offer systems based on woven or ring nets, made of independent steel rings connected in 4-in-1 or 6-in-1 arrangements. These structures are characterized by a high energy absorption capacity owing to plastic deformation and effective load redistribution [6]. Rockfall nets are made of high-carbon steel wire and are characterized by increased tensile strength, high durability, resistance to weather conditions, and energy absorption capacity [7]. The studies by Caviezel and others [8, 9] presented the results of full-scale rockfall barrier tests carried out under field conditions. Tests using rock blocks weighing from 840 to 3200 kg showed that ring nets (ROCCO Butterfly 16/3/350 rings with a ring diameter of 350 mm) are capable of absorbing the total kinetic energy of a block amounting to 1106 kJ, which is sufficiently large compared with the kinetic energy of most small and medium-sized combat drones. Currently available solutions provide energy absorption of up to 2000 kJ [8, 9], and even up to 5000 kJ [10].

Commercial solutions using steel nets of similar technology, employed as anti-drone shields, are currently available on the market. These systems include both mobile and stationary solutions. Their main advantages include low implementation cost, relatively simple installation, and resistance to repeated impacts compared with active protection systems, which may be susceptible to saturation or jamming. Their limitations, however, include the impact on visibility, logistical requirements related to installation, and limited effectiveness against very fast or massive objects. The technology of passive anti-drone protection systems still requires further research and analysis, particularly regarding assessing its effectiveness against diverse threat scenarios.

This paper analyzes a kinetic shield designed to protect energy infrastructure against threats posed by unmanned aerial vehicles or falling debris (Figure 1). Depending on the design requirements and the characteristics of the protected facility, the shield can be used as a vertical or horizontal barrier or as a system completely enclosing the structure.

wych przeznaczonych do obiektów cywilnych jest nadal stosunkowo skromna, co odzwierciedla względną nowość tego zagrożenia w skali masowej. Istniejące rozwiązania bazują głównie na plecionych siatkach metalowych lub polimerowych, instalowanych jako bariery perymetryczne lub osłony nad kluczowymi obiektami. Mechanizm ich działania polega na absorpcji energii kinetycznej przez kontrolowaną deformację siatki, redystrybucję sił wzdłuż lin lub pierścieni oraz wydłużenie drogi hamowania obiektu. Dodatkowo takie konstrukcje mogą wymuszać detonację ładunku w większej odległości od chronionego obiektu, ograniczając oddziaływanie fali uderzeniowej i odłamków [5].

W inżynierii geotechnicznej od wielu lat stosowane są z powodzeniem rozwiązania przeznaczone do przejmowania obciążeń kinetycznych. Są to przede wszystkim siatki przeciwodłamkowe oraz bariery przeciw obrywom skalnym (rockfall barriers), które mogą zostać zaadaptowane do ochrony przeciwdronowej. Firmy oferują systemy bazujące na siatkach plecionych lub pierścieniowych (tzw. ring nets), wykonanych z niezależnych stalowych pierścieni połączonych w układy typu 4-in-1 lub 6-in-1. Konstrukcje te charakteryzują się wysoką zdolnością do pochłaniania energii dzięki plastycznej deformacji oraz efektywnej redystrybucji obciążeń [6]. Siatki przeciwodłamkowe wytwarzane są z drutu ze stali wysokowęglowej i cechują się podwyższoną wytrzymałością na rozciąganie, dużą trwałością, odpornością na warunki atmosferyczne oraz zdolnością do absorpcji energii [7]. W badaniach Caviezela i in. [8, 9] przedstawiono wyniki pełnoskalowych badań barier przeprowadzonych w warunkach terenowych. Testy z wykorzystaniem bloków skalnych o masie $840 \div 3200$ kg wykazały, że siatki pierścieniowe (pierścienie ROCCO Butterfly 16/3/350 o średnicy pierścieni 350 mm) są zdolne do pochłaniania całkowitej energii kinetycznej bloku o wartości 1106 kJ. Wartość ta jest wystarczająco duża w porównaniu z energią kinetyczną większości małych i średnich dronów bojowych. Współczesne rozwiązania zapewniają absorpcję energii do 2000 kJ [8, 9], a nawet do 5000 kJ [10].

Obecnie na rynku dostępne są komercyjne rozwiązania wykorzystujące stalowe siatki stosowane jako osłony przeciwdronowe. Systemy te obejmują zarówno rozwiązania mobilne, jak i stacjonarne. Do ich głównych zalet należą niewielki koszt wdrożenia, stosunkowo prosta instalacja oraz duża odporność na wielokrotne oddziaływanie w porównaniu z aktywnymi systemami ochrony, które mogą być podatne na saturację lub zakłócenia. Ograniczenia obejmują natomiast wpływ na widoczność, wymagania logistyczne związane z montażem oraz ograniczoną skuteczność w przypadku bardzo szybkich lub masywnych obiektów. Technologia pasywnych systemów ochrony przeciwdronowej wymaga dalszych badań i analiz, szczególnie w zakresie oceny skuteczności wobec zróżnicowanych scenariuszy zagrożeń.

W artykule przeanalizowano osłonę kinetyczną przeznaczoną do ochrony infrastruktury energetycznej przed bezzałogowymi statkami powietrznymi lub spadającymi odłamkami (rysunek 1). W zależności od wymagań projektowych oraz charakterystyki chronionego obiektu osłona może być stosowana jako przegroda pionowa, pozioma lub układ całkowicie osłaniający konstrukcję.

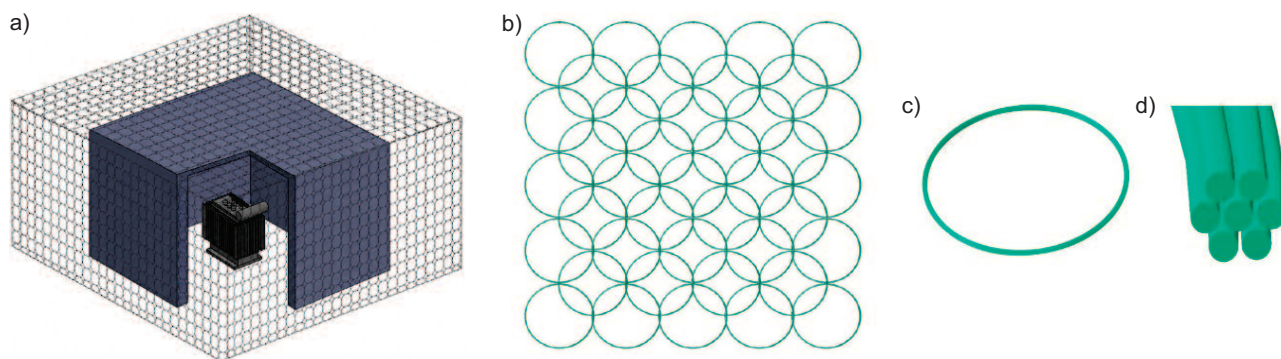


Fig. 1. Protective structure for energy infrastructure with a kinetic shield (a); net of steel rings in a 4-1 weave (b); model of a ring made of a wire coil (c) with its cross-section (d)

Rys. 1. Budowla ochronna infrastruktury energetycznej z osłoną kinetyczną (a); siatka z pierścieni stalowych w splocie 4-1 (b); model pierścienia ze splotu drutów (c) o przekroju (d)

The analyzed protective facility is an independent structure with a rectangular plan measuring 28×30 m (Figure 2a). The external walls were designed as reinforced concrete walls 600 mm thick, reinforced with bidirectional meshes of $\phi 16$ bars of class A400C spaced at 200×200 mm. The roof structure, located at a height of about 18 m, consists of a system of main and secondary steel I-beams made of S275 structural steel, supporting a reinforced concrete protective slab made of class C25/30 concrete. The slab was reinforced with two layers of meshes of $\phi 14$ bars of class A400C spaced at 200×200 mm. The height of the main beams is 0.9 m. A detailed description of the structure is presented in [9].

The shelter was designed with the assumption of ensuring resistance to the blast wave caused by the detonation of a charge with a mass equivalent to 50 kg of TNT. At the same time, it was assumed that the kinetic shield used should stop objects moving with a kinetic energy of up to 100 kJ or cause the detonation of the charge carried by them at a safe distance from the protected structure. Due to the lower resistance of the roof compared with the external walls, the numerical analyses focused on assessing the behavior of the roof structure.

The numerical model covered one quarter of the roof surface using cyclic symmetry conditions, which made it possible to reduce the computational cost while maintaining the representativeness of the results. To determine the minimum safe distance of the detonation point, a series of analyses was carried out in which the height of the charge

Analizowany obiekt ochronny stanowi niezależną konstrukcję o rzucie prostokątnym i wymiarach 28×30 m (rysunek 2a). Ściany zewnętrzne zaprojektowano jako żelbetowe o grubości 600 mm, zbrojone dwukierunkowymi siatkami z prętów klasy A400C o średnicy $\phi 16$ i rozstawie 200×200 mm. Konstrukcję stropodachu, zlokalizowaną na wysokości ok. 18 m, tworzy układ głównych i drugorzędnych belek stalowych dwuteowych wykonanych ze stali konstrukcyjnej S275, na których oparto żelbetową płytę ochronną z betonu klasy C25/30. Płyta została zbrojona dwiema warstwami siatek z prętów klasy A400C o średnicy $\phi 14$ i rozstawie 200×200 mm. Wysokość belek głównych wynosi 0,9 m. Szczegółowy opis konstrukcji przedstawiono w [9].

Ukrycie zaprojektowano przy założeniu zapewnienia odporności na oddziaływanie fali uderzeniowej wywołanej detonacją ładunku o masie równoważnej 50 kg TNT. Przyjęto, że zastosowana osłona kinetyczna powinna zatrzymać obiekty poruszające się z energią kinetyczną do 100 kJ lub doprowadzić do detonacji przenieszonego przez nie ładunku w bezpiecznej odległości od chronionej konstrukcji. Ze względu na mniejszą odporność stropodachu w porównaniu ze ścianami zewnętrznymi, analizy numeryczne skoncentrowano na ocenie zachowania konstrukcji dachowej.

Model numeryczny obejmował jedną czwartą powierzchni dachu z wykorzystaniem warunków cyklicznej symetrii, co pozwoliło ograniczyć koszt obliczeń przy zachowaniu reprezentatywności wyników. W celu wyznaczenia minimalnej bezpiecznej odległości punktu detonacji przeprowadzono serię analiz, w których zmieniano wysokość położenia ładunku

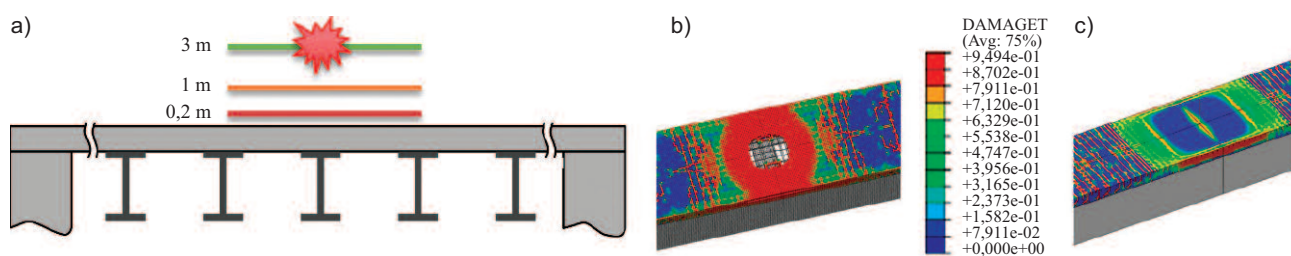


Fig. 2. Dynamic response of the shelter roof to blast loading: a) diagram of the location of the detonation point above the roof; b) damage from detonation 20 cm above the roof; c) damage from detonation 3 m above the roof slab

Rys. 2. Reakcja dynamiczna dachu ukrycia na obciążenie wybuchowe: a) schemat umieszczenia punktu detonacji nad dachem; b) uszkodzenia przy detonacji 20 cm nad dachem; c) uszkodzenia przy detonacji 3 m nad płytą dachową

above the roof surface was varied (Figure 2a). The results of earlier numerical studies [11] showed that detonation directly above the roof slab leads to its critical damage, including a perforation with a diameter of about 1.2 m (Figure 2b). Increasing the detonation distance to 1.0 m reduces the degree of destruction but still causes serious damage to the structure. Only detonation at a height of 3.0 m results in merely local damage to the slab, which was considered acceptable from the point of view of the load-bearing capacity and functionality of the facility (Figure 2c). Based on the results obtained, it was assumed that the kinetic shield in the form of a ring net should be located at a distance of at least 3.0 m from the roof surface, ensuring that a possible detonation is kept at a safe distance from the protected structure.

The kinetic shield consists of a net made of a weave of steel rings with a diameter of 250 mm. Each ring was formed from wire with a diameter of 2 mm, coiled into seven turns. In addition, each successive turn was wrapped five times around the previously laid turns, which ensures the geometric integrity of the ring element and increases its load-bearing capacity. The wire was designed from high-carbon steel with an increased tensile strength of 1770 MPa. The rings were connected in a weave according to the 4-1 pattern, in which four outer rings surround one central ring (Figure 1b). This configuration creates a spatial structure capable of effectively absorbing and redistributing loads caused by impact actions. The net was fastened by means of perimeter steel cables (IWRC) with a diameter of 20 mm, routed through its meshes (rings) in the vertical and horizontal directions. The spacing of the load-bearing cables attached to the supports was 3 m, which ensured adequate support and stabilization of the entire shielding system.

Concept of support structures for kinetic Shields

The design of support structures for kinetic shields depends on the intended purpose of the protective system, the geometry of the protected facility, and the adopted concept of transferring dynamic loads. In practice, shields can be attached directly to the building structure or to independent supporting systems. In the latter case steel columns or lattice towers connected by perimeter cables are most commonly used, providing an appropriate offset of the net from the protected structure. Depending on the required blast resistance and the anticipated deformation of the shield, this distance usually ranges from a few meters to approximately 6 m.

The design of support structures should account not only for static loads but, above all, for the dynamic actions resulting from the impact of an object and for the interaction between the supports and the cable-and-net system. Unlike conventional protective structures, the aim here is to ensure controlled compliance of the entire system. Appropriate deformability of the supports and load-bearing cables makes it possible to extend the braking time of the object, to limit the maximum forces transferred to the foundations and load-bearing elements, and to increase the energy dissipation

nad powierzchnią dachu (rysunek 2a). Wyniki wcześniejszych badań numerycznych [11] wykazały, że detonacja bezpośrednio nad płytą dachową prowadzi do jej krytycznego uszkodzenia, obejmującego przebicie o średnicy ok. 1,2 m (rysunek 2b). Zwiększenie odległości detonacji do 1,0 m ogranicza zakres zniszczenia, ale nadal powoduje poważne uszkodzenia konstrukcji. Dopiero detonacja na wysokości 3,0 m skutkuje lokalnymi uszkodzeniami płyty, które uznano za dopuszczalne z punktu widzenia nośności i funkcjonalności obiektu (rysunek 2c). Na podstawie uzyskanych wyników przyjęto, że osłona kinetyczna w postaci siatki pierścieniowej powinna zostać zlokalizowana w odległości co najmniej 3,0 m od powierzchni dachu, zapewniając bezpieczne odsunięcie ewentualnej detonacji od chronionej konstrukcji.

Oslonę kinetyczną stanowi siatka wykonana ze splotu stalowych pierścieni o średnicy 250 mm. Każdy pierścień utworzono ze splotu drutów o średnicy 2 mm, zwiniętych w siedem zwojów. Dodatkowo każdy kolejny zwój został pięciokrotnie owinięty wokół wcześniej ułożonych zwojów, co zapewnia integralność geometryczną elementu pierścienia oraz zwiększa jego nośność. Drut zaprojektowano z wysokowęglowej stali o podwyższonej wytrzymałości na rozciąganie 1770 MPa. Pierścienie połączono w spłot zgodnie z układem 4-1, w którym cztery pierścienie zewnętrzne otaczają jeden pierścień centralny (rysunek 1b). Taka konfiguracja tworzy przestrzenną strukturę zdolną do efektywnego przejmowania i redystrybucji obciążeń wywołanych oddziaływaniami udarowymi. Siatkę zamocowano za pomocą obwodowych lin stalowych (IWRC) o średnicy 20 mm, prowadzonych przez jej oczka (pierścienie) w kierunkach pionowym i poziomym. Rozstaw lin nośnych, mocowanych do podpór wynosił 3 m, co zapewniało odpowiednie podparcie oraz stabilizację całego układu osłonowego.

Koncepcja konstrukcji wsporczych osłon kinetycznych

Rozwiązania konstrukcji wsporczych osłon kinetycznych zależą od przeznaczenia systemu ochronnego, geometrii chronionego obiektu oraz przyjętej koncepcji przejmowania obciążeń dynamicznych. W praktyce osłony mogą być mocowane bezpośrednio do konstrukcji budynku lub do niezależnych układów wsporczych. W pierwszym przypadku najczęściej stosowane są stalowe słupy lub wieże kratowe połączone linami obwodowymi, zapewniające odpowiednie odsunięcie siatki od chronionej konstrukcji. W zależności od wymaganej odporności na oddziaływanie wybuchowe oraz przewidywanej deformacji osłony odległość ta wynosi zazwyczaj od kilku do ok. 6 m.

Projektowanie konstrukcji wsporczych powinno uwzględniać nie tylko obciążenia statyczne, ale przede wszystkim oddziaływania dynamiczne wynikające z uderzenia obiektu oraz współpracę podpór z układem lin i siatki. W przeciwieństwie do klasycznych konstrukcji ochronnych, dąży się do zapewnienia kontrolowanej podatności całego systemu. Odpowiednio dobrana odkształcalność podpór oraz lin nośnych umożliwia wydłużenie czasu hamowania obiektu, ograniczenie wartości maksymalnych sił przekazywanych do fundamentów i elementów nośnych oraz zwiększenie zdolności układu

capacity of the system. Excessive stiffness of the support structure could lead to local concentrations of forces and to more rapid damage of the net. For this reason, many solutions used in geotechnical engineering and protective systems use slender steel structures with guy cables or compliant spatial frames, whose deformation constitutes an integral part of the energy absorption mechanism. When existing energy infrastructure facilities are to be protected, an advantageous solution may also be to locate the supports as independent structures founded adjacent to the protected facility, which limits the transfer of dynamic loads to the building structure.

In the present study, attention was focused on the behavior of the ring net as the main component responsible for absorbing the impact energy. The support structures were treated as a component of the protective system, whose detailed design requires separate analyses covering the interaction between the net, the load-bearing cables, the supports, and the foundations.

Constitutive model of the steel ring

The kinetic shield, which consists of a net of steel wires, is exposed to dynamic actions leading to large strains under conditions of large displacements, high strain rates, and elevated temperatures. Under such conditions, it is justified to use the Johnson-Cook (J-C) model, which reproduces complex physical phenomena. The model consists of two basic parts: a description of elastic-plastic yielding and a criterion for damage initiation and evolution. The elastic-plastic model is described by the relationship:

$$\sigma = (A + B \cdot \epsilon_p^n) \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

where:

A – yield stress of the material under quasi-static conditions;
B – strain hardening coefficient, defining the increase in stress with strain;
n – hardening exponent, describing the nonlinear character of the yield curve;
 ϵ_p – plastic strain;
C – strain rate sensitivity coefficient;
 $\dot{\epsilon}$ – current strain rate;
 $\dot{\epsilon}_0$ – reference strain rate;
 T^* – reduced temperature, dependent on the reference temperature and the melting temperature;
m – exponent describing the effect of temperature on material softening.

The first term of the Johnson-Cook constitutive equation describes the phenomenon of material hardening, the second considers the effect of strain rate on the increase in yield stress, and the third reflects the degradation of mechanical properties resulting from the increase in temperature. This form of the model enables an unambiguous physical interpretation of the individual parameters.

The damage model is based on the concept of damage accumulation (1), whereby material failure occurs once the damage parameter reaches its critical value ($D = 1$). The failure strain (ϵ_f) is a function of the stress state, strain rate, and temperature, owing to which the model considers the

do rozpraszania energii. Nadmierna sztywność konstrukcji wsporczej mogłaby prowadzić do lokalnej koncentracji sił i szybszego uszkodzenia siatki. Z tego względu w wielu rozwiązaniach stosowanych w geotechnice oraz systemach ochronnych wykorzystuje się smukłe konstrukcje stalowe z ociągami lub podatne ramy przestrzenne, których deformacja stanowi integralny element mechanizmu absorpcji energii. W przypadku ochrony istniejących obiektów infrastruktury energetycznej korzystnym rozwiązaniem może być również lokalizowanie podpór jako niezależnych konstrukcji posadowionych obok chronionego obiektu, co ogranicza przekazywanie obciążeń dynamicznych na konstrukcję budynku.

W artykule skoncentrowano się na analizie zachowania siatki pierścieniowej jako głównego elementu odpowiedzialnego za pochłanianie energii uderzenia. Konstrukcje wsporcze traktowano jako element systemu ochronnego, którego szczegółowe projektowanie wymaga odrębnych analiz obejmujących współpracę siatki, lin nośnych, podpór oraz fundamentów.

Model konstytutywny pierścienia stalowego

Ośłona kinetyczna, która składa się z siatki prętów stalowych, jest narażona na oddziaływania dynamiczne prowadzące do powstania dużych odkształceń w przypadkach dużych przemieszczeń, dużej prędkości odkształceń oraz podwyższonej temperatury. W takich warunkach zasadne jest wykorzystanie modelu Johnsona-Cooka (J-C), który zapewnia odwzorowania złożonych zjawisk fizycznych. Model ten składa się z dwóch podstawowych części: opisu sprężysto-plastycznego uplastycznienia oraz kryterium inicjacji i rozwoju zniszczenia. Model sprężysto-plastyczny opisany jest zależnością:

$$\sigma = (A + B \cdot \epsilon_p^n) \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

gdzie:

A – granica plastyczności materiału w warunkach quasi-statycznych;
B – współczynnik umocnienia odkształceniowego, określający przyrost naprężenia wraz z odkształceniem;
n – wykładnik umocnienia, opisujący nieliniowy charakter krzywej uplastycznienia;
 ϵ_p – odkształcenie plastyczne;
C – współczynnik wrażliwości na prędkość odkształcenia;
 $\dot{\epsilon}$ – aktualna prędkość odkształcenia;
 $\dot{\epsilon}_0$ – referencyjna prędkość odkształcenia;
 T^* – temperatura zredukowana, zależna od temperatury odniesienia i temperatury topnienia;
m – wskaźnik opisujący wpływ temperatury na osłabienie materiału.

Pierwszy człon równania konstytutywnego modelu Johnsona-Cooka opisuje zjawisko wzmocnienia materiału, drugi uwzględnia wpływ prędkości odkształcenia na wzrost naprężeń uplastyczniających, a trzeci odzwierciedla degradację właściwości mechanicznych wynikającą ze wzrostu temperatury. Taka postać modelu umożliwia jednoznaczna interpretację fizyczną poszczególnych parametrów.

Model zniszczenia bazuje na koncepcji akumulacji uszkodzeń (1), przy czym zniszczenie materiału następuje po osiągnięciu wartości parametru uszkodzenia ($D = 1$). Odkształcenie niszczące (ϵ_f) stanowi funkcję stanu naprężenia, prędkości odkształcenia oraz temperatury, dzięki czemu model

most important mechanisms responsible for the initiation and development of material failure.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\Delta \varepsilon_f} \quad (2)$$

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \cdot \exp D_3 \cdot \sigma^*) \cdot (1 + D_4 \cdot \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})) (1 + D_5 \cdot T^*) \quad (3)$$

where:

$D_1 - D_5$ – empirical material parameters defining the influence of various factors on the failure process;

σ^* – stress triaxiality, defined as the ratio of the hydrostatic stress to the equivalent stress.

Particularly important is the effect of positive stress triaxiality, corresponding to hydrostatic tension, which leads to a reduction in the ductility of the material and accelerates its failure process. This phenomenon occurs, among others, during impact, explosive, and ballistic actions, in which local stress states undergo rapid changes.

The parameters of the Johnson-Cook model were adopted based on the experimental results of Lei Yang et al. [11] for 1770 MPa steel.

Tensile strength testing of a three-ring system

The geometry of a single ring was reproduced in two variants. The first was a multi-coil model corresponding to the actual ring structure, 250 mm in diameter (D250) and made of 2 mm wire (d2) coiled into seven turns (n7) (ring d2 n7 D250), which also accounted for the fivefold wrapping of each successive turn around the previously laid turns (Figure 3a). The following notation is used throughout the paper to identify the ring variants: d – denotes the wire diameter, n – denotes the number of turns, and D – denotes the ring diameter. The second variant was a simplified model of a solid ring with an equivalent cross-section diameter of 5.3 mm. In the multi-coil model, contact between the individual turns was considered using Coulomb friction with a coefficient of $\mu = 0,2$, which made it possible to reproduce the mutual mechanical interactions during deformation and load transfer.

In the first stage of the research, a numerical analysis of a connection composed of three cooperating rings subjected to axial tension was carried out. The analyses were performed in the SIMULIA Abaqus/Explicit environment. In the initial loading phase, the play resulting from the geometry of the connection was removed, after which the rings began to undergo intense deformation. It was observed that already at the initial stage of deformation, the individual turns of the ring moved relative to one another, arranging themselves side by side in a single layer and following the current shape of the deformed ring (Figure 3b). This mechanism led to the redistribution of stresses between the individual turns

uwzględnia najważniejsze mechanizmy odpowiedzialne za inicjację i rozwój zniszczenia materiału.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\Delta \varepsilon_f} \quad (2)$$

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \cdot \exp D_3 \cdot \sigma^*) \cdot (1 + D_4 \cdot \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})) (1 + D_5 \cdot T^*) \quad (3)$$

gdzie:

$D_1 - D_5$ – empiryczne parametry materiałowe określające wpływ różnych czynników na proces zniszczenia;

σ^* – trójosiowość naprężeń, definiowana jako stosunek naprężenia hydrostatycznego do naprężenia zredukowanego.

Szczególnie istotny jest wpływ dodatniej trójosiowości naprężeń, odpowiadającej rozciąganiu hydrostatycznemu, która prowadzi do zmniejszenia odkształcalności materiału i przyspiesza proces jego zniszczenia. Zjawisko to występuje m.in. podczas oddziaływań uderowych, wybuchowych i balistycznych, w których lokalne stany naprężeń ulegają gwałtownym zmianom.

Parametry modelu Johnsona Cooka zostały przyjęte na podstawie wyników badań eksperymentalnych Lei Yang et al. [11] w przypadku stali 1770 MPa.

Badanie wytrzymałości na rozciąganie układu z trzech pierścieni

Geometrię pojedynczego pierścienia odwzorowano w dwóch wariantach. Pierwszy stanowił model wielozwojowy, odpowiadający rzeczywistej konstrukcji pierścienia o średnicy 250 mm (D250) wykonanej z drutu o średnicy 2 mm (d2), zwiniętego w siedem zwojów (n7) – d2 n7 D250, z uwzględnieniem pięciokrotnego owinięcia każdego kolejnego zwoju wokół wcześniej ułożonych zwojów (rysunek 3a). W artykule przyjęto jednolity sposób oznaczania wariantów pierścieni, w którym d to średnica drutu, n – liczba zwojów, a D – średnica pierścienia. Drugi wariant stanowił uproszczony model litego pierścienia o równoważnej średnicy przekroju 5,3 mm. W modelu wielozwojowym uwzględniono kontakt pomiędzy poszczególnymi zwojami z zastosowaniem tarcia Coulomba o współczynniku $\mu = 0,2$, co umożliwiło odwzorowanie wzajemnych oddziaływań mechanicznych podczas deformacji i przenoszenia obciążeń.

W pierwszym etapie badań przeprowadzono analizę numeryczną połączenia złożonego z trzech współpracujących pierścieni poddanych osiowemu rozciąganiu. Analizy wykonano w środowisku SIMULIA Abaqus/Explicit. W początkowej fazie obciążania następowało usunięcie luzów wynikających z geometrii połączenia, po czym pierścienie zaczynały ulegać intensywnym odkształceniom. Zaobserwowano, że już na początkowym etapie deformacji poszczególne zwoje pierścienia przemieszczały się względem siebie, układając się obok siebie w jednej warstwie i odwzorowując aktualny kształt odkształconego pierścienia (rysunek 3b). Mechanizm ten prowadził do redystrybucji naprężeń pomiędzy poszczególnymi

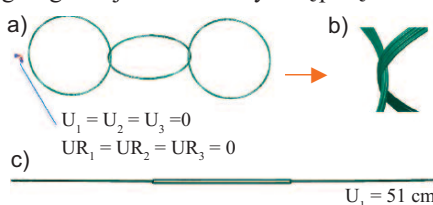


Fig. 3. Tension of a three-ring system: a) numerical model; b) character of coil deformation under tension; c) deformation of the system of rings with an equivalent cross-section before failure

Rys. 3. Rozciąganie układu z trzech pierścieni: a) model numeryczny; b) charakter deformacji zwojów przy rozciąganiu; c) deformacja układu z pierścieni o przekroju równoważnym przed zniszczeniem

ściennymi poddanych osiowemu rozciąganiu. Analizy wykonano w środowisku SIMULIA Abaqus/Explicit. W początkowej fazie obciążania następowało usunięcie luzów wynikających z geometrii połączenia, po czym pierścienie zaczynały ulegać intensywnym odkształceniom. Zaobserwowano, że już na początkowym etapie deformacji poszczególne zwoje pierścienia przemieszczały się względem siebie, układając się obok siebie w jednej warstwie i odwzorowując aktualny kształt odkształconego pierścienia (rysunek 3b). Mechanizm ten prowadził do redystrybucji naprężeń pomiędzy poszczególnymi

and the equalization of their effort. At the same time, the bending stiffness of the cross-section decreased in the zones of contact with adjacent rings, which allowed the geometry of the connection to adapt more effectively to the imposed strain state. An analogous analysis was carried out for the simplified model of a solid ring with an equivalent cross-section diameter of 5.3 mm. The maximum force obtained was 124.8 kN, and the displacement was 51 cm.

Simulation of a net of rings in a 4-1 weave under kinetic loading

The next stage of the research involved assessing the resistance of the ring net with a 4-1 weave (Figure 1b) to kinetic loading. The kinetic shield should stop objects with a kinetic energy of 100 kJ. To assess the resistance of the ring weave itself, excluding the influence of the fastening elements, a fragment of the net measuring approximately 3×3 m, consisting of 12×24 rings, was analyzed (d5.3 n1 D250). Full fixity of all rings was assumed along the perimeter of the model, ensuring unambiguously defined boundary conditions and eliminating edge displacements. A perfectly rigid sphere with a diameter of 500 mm and a mass of 200 kg was adopted as the impacting object, moving with an initial velocity of $v_0 = 50$ m/s, which corresponds to a kinetic energy of 250 kJ. As a preliminary criterion of sufficient shield resistance, slowing the sphere down to a velocity of at least 38.7 m/s was adopted.

The sphere was placed in the immediate vicinity of the net surface, which made it possible to minimize the influence of the free-flight phase and to focus the analysis on the course of the contact phenomenon and the response of the structure to the kinetic load. The developed numerical model consisted of 2,988,729 degrees of freedom and considered nonlinear contact phenomena and large displacements resulting from the deformation of the rings during the impact (Figure 4a).

As a result of the analyses, it was found that immediately after contact with the sphere, intense deformation of the protective net occurred, accompanied by the dissipation of kinetic energy and gradual deceleration of the sphere's motion. Within 0.058 s, the maximum deflection of the net reached 310 cm. At the same time, the load-bearing capacity of the rings was exceeded, the rings ruptured, and the shield was perforated. The maximum force in the rings adjacent to the sphere reached 96 kN, which corresponds to the load-bearing capacity previously determined for a single connection and con-

zwojami oraz wyrównania ich wyężenia. Jednocześnie zmniejszała się sztywność giętna przekroju w strefach kontaktu z sąsiednimi pierścieniami, co umożliwiało bardziej efektywne dopasowanie geometrii połączenia do wymuszonego stanu odkształcenia. Analogiczną analizę przeprowadzono w przypadku uproszczonego modelu pierścienia litego o równoważnej średnicy przekroju 5,3 mm. Uzyskana maksymalna siła wyniosła 124,8 kN, a przemieszczenie 51 cm.

Symulacja siatki z pierścieni w splocie 4-1 pod obciążeniem kinetycznym

Kolejny etap badań obejmował ocenę odporności siatki pierścieniowej o splocie 4-1 (rysunek 1b) na oddziaływanie obciążenia kinetycznego. Osłona kinetyczna powinna zatrzymać obiekty o energii kinetycznej 100 kJ. W celu oceny odporności samego splotu pierścieni, z pominięciem wpływu elementów mocujących, analizie poddano fragment siatki o wymiarach ok. 3×3 m, składający się z 12×24 pierścieni (d5.3 n1 D250). Na obwodzie modelu przyjęto pełne utwierdzenie wszystkich pierścieni, zapewniające jednoznacznie zdefiniowane warunki brzegowe oraz eliminujące przemieszczenia krawędziowe. Jako obiekt uderzający przyjęto idealnie sztywną kulę o średnicy 500 mm i masie 200 kg, poruszającą się z prędkością początkową $v_0 = 50$ m/s, co odpowiada energii kinetycznej 250 kJ. Jako wstępne kryterium wystarczającej odporności osłony założono spowolnienie kuli do prędkości co najmniej 38,7 m/s.

Kula została umieszczona w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni siatki, co umożliwiło minimalizację wpływu fazy swobodnego lotu i skoncentrowanie analizy na przebiegu zjawiska kontaktowego oraz odpowiedzi konstrukcji na obciążenie kinetyczne. Opracowany model numeryczny składał się z 2 988 729 stopni swobody i zapewniał uwzględnienie nieliniowych zjawisk kontaktowych oraz dużych przemieszczeń na skutek deformacji pierścieni podczas oddziaływania udarowego (rysunek 4a).

W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono, że bezpośrednio po kontakcie z kulą nastąpiła intensywna deformacja siatki ochronnej (rysunek 4b), której towarzyszyło rozpraszanie energii kinetycznej oraz stopniowe wyhamowywanie ruchu kuli. W czasie 0,058 s maksymalne ugięcie siatki osiągnęło

wartość 310 cm. Jednocześnie doszło do przekroczenia nośności pierścieni, ich rozerwania oraz przebicia osłony. Maksymalna siła w pierścieniach obok kuli osiągnęła wartość 96 kN, co odpowiada nośności wyznaczonej wcześniej dla pojedynczego połączenia i potwierdza, że

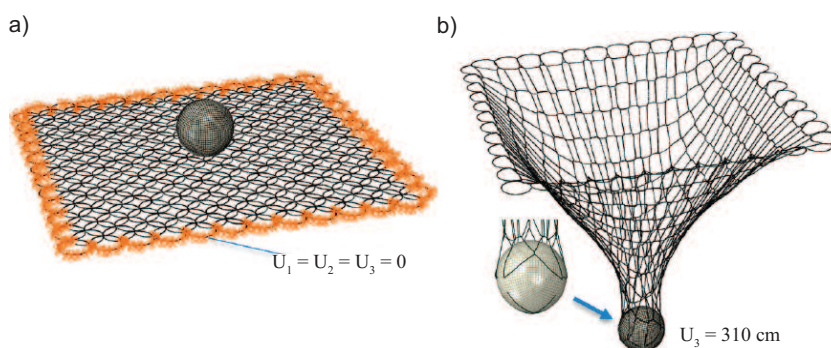


Fig. 4. Numerical model of the shield net (a) and its deformation at the moment of failure; $t = 0.058$ s (b)

Rys 4. Model numeryczny siatki osłony (a) oraz deformacja w momencie zniszczenia; $t = 0,058$ s (b)

firms that failure occurred as a result of the exhaustion of the material's strength. After perforation of the net, the velocity of the sphere decreased from 50 to 46.6 m/s, which corresponds to the energy absorbed by the ring weave alone amounting to:

$$E_{ks} = 200 \cdot (50^2 - 46,6^2)/2 = 32,8 \text{ [kJ]} \quad (4)$$

The results obtained indicate that the ring net, considered without the fastening system, exhibits a limited energy absorption capacity and can constitute an effective shield only against objects with moderate kinetic energy. Achieving the required energy dissipation requires the inclusion of additional load-bearing elements. A particularly important role in energy dissipation is played by the steel fastening cables, whose high load-bearing capacity and stiffness enable the redistribution of loads over a larger area of the net, engaging a much larger number of rings and increasing the total capacity of the system to absorb impact energy.

Simulation of a net of rings in a 4-1 weave under kinetic loading, reinforced with steel cables

In order to increase the resistance of the system and improve the redistribution of forces between the rings during impact, the numerical model was supplemented with a perimeter system of steel cables with a diameter of 20 mm anchored at the corners of the net structure and a system of internal cables ($\varnothing 20$ mm) connected to the perimeter cables. Sliding was allowed at the points where the cables cross. The cables were interwoven in one direction with a spacing of approximately 750 mm, corresponding to every third row of the weave (Figure 5a). In the numerical model, they were represented by three-dimensional solid elements, which were given a wavy geometry corresponding to the actual course of the cable in the net structure. To account for bending flexibility and to eliminate artificial stiffening of the model, a homogenization approach to the material properties was applied, replacing the actual cable structure with an equivalent transversely isotropic material. The elastic modulus of steel ($E_1 = 210$ GPa) was assigned only in the longitudinal direction along the local axis of the cable, while the transverse stiffnesses were reduced ($E_2 = E_3 = 0,001 \cdot E_1$). The shear parameters were determined in accordance with the relationships for a transversely isotropic material, adopting the values of the shear moduli $G_{23} = 80,77$ MPa and $G_{12} = G_{13} = 104,90$ MPa ($\nu_{12} = \nu_{13} = 0,001$, $\nu_{23} = 0,3$). The developed numerical model of the structure with interwoven cables contained 3,484,638 degrees of freedom and is shown in Figure 5a.

The numerical analysis showed that the use of the steel cable

zniszczenie nastąpiło wskutek wyczerpania wytrzymałości materiału. Po przebicciu siatki prędkość kuli zmniejszyła się z 50 do 46,6 m/s, co odpowiada energii pochłoniętej przez sam splot pierścieni równej:

$$E_{ks} = 200 \cdot (50^2 - 46,6^2)/2 = 32,8 \text{ [kJ]} \quad (4)$$

Uzyskane wyniki wskazują, że siatka pierścieniowa, rozpatrywana bez układu mocującego, wykazuje ograniczoną zdolność absorpcji energii i może stanowić skuteczną osłonę jedynie przed obiektami o umiarkowanej energii kinetycznej. Osiągnięcie wymaganej dyssypacji energii wymaga włączenia dodatkowych elementów nośnych. W dyssypacji energii szczególnie istotną rolę odgrywają liny stalowe mocujące, których duża nośność i sztywność umożliwiają redystrybucję obciążeń na większy obszar siatki, angażując do pracy znacznie większą liczbę pierścieni i zwiększając całkowitą zdolność układu do pochłaniania energii uderu.

Symulacja siatki z pierścieni w splotie 4-1 wzmocnionej linami stalowymi pod obciążeniem kinetycznym

W celu zwiększenia odporności układu oraz poprawy redystrybucji sił pomiędzy pierścieniami podczas oddziaływania udarowego, model numeryczny uzupełniono o obwodowy układ lin stalowych o średnicy 20 mm zakotwiony w narożnikach konstrukcji siatki oraz układ lin wewnętrznych ($\varnothing 20$ mm) połączonych z linami obwodowymi. W miejscach krzyżowania się lin zapewniona została możliwość poślizgu. Liny wpleciono w jednym kierunku z rozstawem ok. 750 mm, odpowiadającym co trzeciemu rzędowi splotu (rysunek 5a). W modelu numerycznym odwzorowano je za pomocą trójwymiarowych elementów bryłowych (solid), którym nadano pofalowaną geometrię odpowiadającą rzeczywistemu przebiegowi liny w strukturze siatki. W celu uwzględnienia podatności na zginanie oraz wyeliminowania sztucznego usztywnienia modelu zastosowano podejście homogenizacji właściwości materiałowych, zastępując rzeczywistą konstrukcję liny równoważnym materiałem transwersalnie izotropowym. Moduł sprężystości stali ($E_1 = 210$ GPa) przypisano wyłącznie w kierunku podłużnym wzdłuż lokalnej osi liny, natomiast sztywność poprzeczną zredukowano ($E_2 = E_3 = 0,001 \cdot E_1$). Parametry ścinania wyznaczono zgodnie z zależnościami materiału transwersalnie izotropowego, przyjmując wartości modułów Kirchhoffa $G_{23} = 80,77$ MPa oraz $G_{12} = G_{13} = 104,90$ MPa ($\nu_{12} = \nu_{13} = 0,001$, $\nu_{23} = 0,3$). Opracowany model numeryczny konstrukcji z wplecionymi linami zawierał 3 484 638 stopni swobody i został przedstawiony na rysunku 5a.

Analiza numeryczna wykazała, że zastosowanie układu

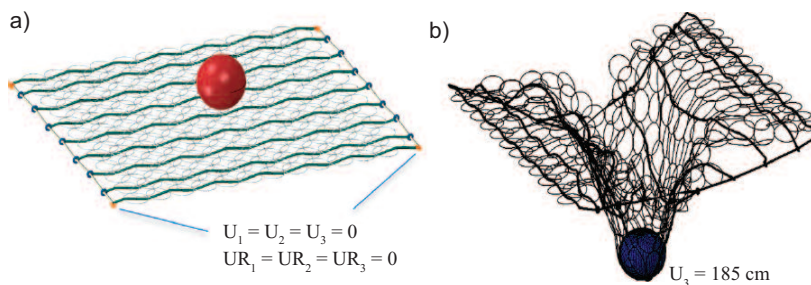


Fig. 5. Numerical model of the ring net reinforced with steel cables (a) and deformation of the net with the vertical displacement scale; $t = 0.041$ s (b)

Rys. 5 Model numeryczny siatki z pierścieni wzmocnionej linami stalowymi (a) oraz deformacja siatki ze skalą przemieszczeń pionowych; $t = 0,041$ s (b)

system significantly changed the mechanism of load transfer and kinetic energy dissipation. In the initial phase of the impact, the impact energy is transferred from the rings directly to the reinforcing cables. Thanks to the possibility of mutual sliding and the flexibility of the system, the loads do not concentrate locally, but are gradually redistributed along the cable strands, activating the perimeter cables and an increasingly large area of the net (Figure 5b). This mechanism leads to a much more uniform utilization of the load-bearing capacity of the entire structure compared with a net without reinforcing elements. After 0.041 s from the moment of contact, the maximum deflection of the net reached 185 cm, while the velocity of the sphere decreased to 38.6 m/s. This corresponds to the absorption of about 101 kJ of kinetic energy, which represents an almost threefold increase in energy absorption capacity compared with the model without steel cables. The analysis of the energy history showed that up to about 0.023 s, the dominant mechanism was the reversible elastic deformation of the structure. In the subsequent phase of loading, an increasingly large share in the energy dissipation process was taken by the permanent plastic deformations of the rings and the friction occurring between the cooperating elements of the net. The state of deformation of the structure at this stage indicates that the system had not yet reached its ultimate load-bearing capacity. The rings located in the three outermost rows remained practically unengaged in load transfer, and the perimeter cables were not fully tensioned. This demonstrates the existence of a significant load-bearing capacity reserve and the further ability of the system to absorb energy during subsequent stages of deformation.

Summary and conclusions

The mechanism of operation of a kinetic shield made of a ring net is based on absorbing the kinetic energy of the impacting object through progressive geometric and plastic deformation of the rings and redistribution of forces throughout the weave structure. Unlike rigid shields, which stop an object over a short braking distance, the ring net extends the interaction time, limiting the value of the maximum impact force. The consequence of this mechanism is considerable deflection of the structure, which must be considered when determining the minimum distance between the shield and the protected object.

The analyses carried out showed that a fundamental role in the operation of the system is played by the steel cables, which are responsible for the effective redistribution of loads and for increasing the structure's energy absorption capacity. However, the influence of their mechanical properties and the manner of their interaction with the ring net requires further detailed numerical and experimental studies using more advanced material models.

Based on the analyses carried out, the following conclusions were formulated:

- ring nets, can be effectively used as kinetic shields for energy infrastructure facilities;

du lin stalowych istotnie zmieniło mechanizm przenoszenia obciążeń oraz dyssypacji energii kinetycznej. W początkowej fazie oddziaływania uderowego energia uderzenia jest przekazywana z pierścieni bezpośrednio na liny wzmacniające. Dzięki możliwości wzajemnego poślizgu oraz podatności układu, obciążenia nie koncentrują się lokalnie, lecz ulegają stopniowej redystrybucji wzdłuż pasm linowych, aktywując do pracy liny obwodowe oraz coraz większy obszar siatki (rysunek 5b). Mechanizm ten prowadzi do znacznie bardziej równomiernego wykorzystania nośności całej konstrukcji w porównaniu z siatką pozbawioną elementów wzmacniających. Po czasie 0,041 s od momentu kontaktu maksymalne ugięcie siatki osiągnęło 185 cm, natomiast prędkość kuli zmniejszyła się do 38,6 m/s. Odpowiada to pochłonięciu ok. 101 kJ energii kinetycznej, co stanowi niemal trzykrotny wzrost zdolności absorpcji energii w porównaniu z modelem pozbawionym lin stalowych. Analiza rozpraszania energii wykazała, że do ok. 0,023 s dominującym mechanizmem była odwracalna deformacja sprężysta konstrukcji. W dalszej fazie obciążenia coraz większy udział w procesie rozpraszania energii miały trwałe odkształcenia plastyczne pierścieni oraz tarcie występujące pomiędzy współpracującymi elementami siatki. Stan odkształcenia konstrukcji na tym etapie wskazuje, że układ nie osiągnął nośności granicznej. Pierścienie zlokalizowane w trzech skrajnych rzędach pozostawały praktycznie niezaangażowane w przenoszenie obciążeń, a liny obwodowe nie zostały w pełni naprężone. Świadczy to o istnieniu znacznej rezerwy nośności oraz dalszej zdolności układu do pochłaniania energii podczas kolejnych etapów deformacji.

Podsumowanie i wnioski

Mechanizm działania osłony kinetycznej wykonanej z siatki pierścieniowej polega na pochłanianiu energii kinetycznej uderzającego obiektu przez progresywną deformację geometryczną i plastyczną pierścieni oraz redystrybucję sił w całej strukturze splotu. W przeciwieństwie do osłon sztywnych, które zatrzymują obiekt na niewielkiej drodze hamowania, siatka pierścieniowa wydłuża czas oddziaływania, ograniczając wartość maksymalnej siły uderu. Konsekwencją takiego mechanizmu jest znaczne ugięcie konstrukcji osłony, które należy uwzględnić przy wyznaczaniu minimalnej odległości pomiędzy osłoną a chronionym obiektem.

Przeprowadzone analizy wykazały, że zasadniczą rolę w pracy układu odgrywają liny stalowe, odpowiadające za efektywną redystrybucję obciążeń oraz zwiększenie zdolności konstrukcji do pochłaniania energii. Wpływ ich właściwości mechanicznych i sposobu współpracy z siatką pierścieniową wymaga jednak dalszych, szczegółowych badań numerycznych i eksperymentalnych z wykorzystaniem bardziej zaawansowanych modeli materiałowych.

Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano następujące wnioski:

- siatki pierścieniowe mogą być efektywnie wykorzystywane jako osłony kinetyczne obiektów infrastruktury energetycznej;

- it was shown that the analyzed ring net, considered without reinforcing elements, can absorb kinetic energy at a level of about 32 kJ. This corresponds to effective protection against objects with low kinetic energy, such as light unmanned aerial vehicles or fragments of larger drones. At the same time, it was found that local load concentration leads to the rapid attainment of the load-bearing capacity of the rings and local rupture of the net;

- the use of interwoven steel cables enables a much more effective redistribution of forces and the engagement of a larger number of rings, which translates into a significant increase in the load-bearing capacity and energy absorption capacity of the entire system. In the analyzed case, this solution made it possible to reduce the kinetic energy by 100 kJ, with the shield exhibiting a reserve of load-bearing capacity;

- the maximum deflection of the shield made of the net alone was 301 cm, while that of the shield reinforced with cables (at the stage of energy reduction by 100 kJ) reached 185 cm. Combined with the required minimum distance of 3.0 m, resulting from the structure's resistance to the blast wave, and the displacement associated with the flexibility of the supports themselves, this leads to the necessity of placing the shield at a distance of at least 6 m from the protected object;

- the results obtained confirm the high effectiveness of the proposed solution and indicate its potential for use as an element of the protection of energy infrastructure against threats generated by unmanned aerial vehicles.

We gratefully acknowledge Polish high-performance computing infrastructure PLGrid (HPC Centers: CI TASK) for providing computer facilities and support within computational grant no. PLG/2026/019773.

Received: 28.04.2026
Revised: 03.06.2026
Published: 23.09.2026

- analizowana siatka z pierścieni, rozpatrywana bez elementów wzmacniających, jest zdolna do pochłonięcia energii kinetycznej ok. 32 kJ. Odpowiada to skutecznej ochronie przed obiektami o niewielkiej energii kinetycznej, takimi jak lekkie bezzałogowe statki powietrzne lub fragmenty większych dronów. Stwierdzono, że lokalna koncentracja obciążeń prowadzi do szybkiego osiągnięcia nośności pierścieni i lokalnego rozerwania siatki;

- zastosowanie wplecionych lin stalowych umożliwia znacznie efektywniejszą redystrybucję sił oraz włączenie do pracy większej liczby pierścieni, co przekłada się na istotny wzrost nośności i zdolności absorpcji energii całego układu. W analizowanym przypadku rozwiązanie to pozwoliło obniżyć energię kinetyczną o 100 kJ, przy czym osłona wykazywała zapas nośności;

- maksymalne ugięcie osłony z samej siatki wyniosło 301 cm, natomiast osłony wzmocnionej linami (na etapie redukcji energii o 100 kJ) 185 cm. W połączeniu z wymaganą minimalną odległością 3,0 m, wynikającą z odporności konstrukcji na oddziaływanie fali wybuchowej, oraz przemieszczeniem związanym z podatnością samych podpór prowadzi to do konieczności umieszczenia osłony w odległości co najmniej 6 m od chronionego obiektu;

- uzyskane wyniki potwierdzają dużą skuteczność zaproponowanego rozwiązania oraz wskazują na jego potencjał do zastosowania jako elementu ochrony infrastruktury energetycznej przed zagrożeniami generowanymi przez bezzałogowe statki powietrzne.

Autorzy składają podziękowania PLGrid (Centrum HPC: CI TASK) za udostępnienie zasobów obliczeniowych oraz wsparcie w ramach grantu obliczeniowego nr PLG/2026/019773.

Artykuł wpłynął do redakcji: 28.04.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 03.06.2026 r.
Opublikowano: 23.09.2026 r.

Literature

- [1] Franklin WC. Barrage Balloons for Low-Level Air Defense. Maxwell AFB, AL, USA: Air War College, Air University, 1987, Rep. No. AD-A192618. [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA-192618.pdf>. Accessed: Jun. 21, 2026.
- [2] Velychko L, Huzyk N, Sokulska N, Bilash O. Inzhenerni rishennia ubezpechennia ob'ektiv vid povitrianykh zahroz. Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk. 2025. DOI: 10.33577/2312-4458.33.2025.169-175.
- [3] Missiles, Guns, Lasers, and Nets: The Case for Passive Drone Defenses. [Online]. Available: <https://mwi.westpoint.edu/missiles-guns-lasers-and-nets-the-case-for-passive-drone-defenses/>. Accessed: Jun. 21, 2026.
- [4] Hardened Structures, Nets for Drone Defense Front and Center in New Pentagon Guidance. [Online]. Available: <https://www.twz.com/news-features/hardened-structures-nets-for-drone-defense-front-and-center-in-new-pentagon-guidance>. Accessed: Jun. 21, 2026.
- [5] Counter Drone Nets. [Online]. Available: <https://www.thinkdefence.co.uk/2024/12/counter-drone-nets/>. Accessed: Jun. 21, 2026.
- [6] Badger TC, Fish M, Lowell S, Allen T. Design, Construction, and Maintenance of Rockfall Ring Net Draperies. Washington, DC, USA: Washington State Department of Transportation, 2009, Rep. No. WA-RD 729.1.

- [7] Washington State Department of Transportation, Design, Construction, and Maintenance of Rockfall Ring Net Draperies. [Online]. Available: <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/729.1.pdf>. Accessed: Jun. 21, 2026.
- [8] Sanchez MA, Caviezel A. Full-scale Testing of Rockfall Nets in Real Terrain: Results of Tests at Chant Sura, 13th September and 4th October 2019. WSL Berichte 97, Birmensdorf, Switzerland, 2020.
- [9] Caviezel A, Munch J, Bartelt P, Lanter A. Rockfall Barrier Service Loads for Rock Impacts with Spin: Theory and Experiments. WSL Berichte 125, Birmensdorf, Switzerland, 2022. DOI: 10.55419/wsl:32009.
- [10] Trad A, Limam A, Bertrand D, Robit P. Multi-scale Analysis of an Innovative Flexible Rockfall Barrier in Proceedings of the International Conference on Structures under Shock and Impact. 2013. DOI: 10.1002/9781118601532.ch9.
- [11] Lytvyn O, Sakharov V. Symulacje odporności ukryć z osłonami kinetycznymi na oddziaływanie bojowych UAV, in Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Awarie Budowlane”, Międzyzdroje, Poland, May 18-22, 2026.
- [12] Yang L, Qi S-B, Zhi X-D, Wu C-Y, Huang G-Y, Wang X-P. Strain Rate and Temperature Rate Behavior of Ultra-High-Strength 1770 Steel: Base for Transverse Impact Analysis. 2024. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.05.102.