



**ANALIZA OCHRANIACZY I OSŁON BALISTYCZNYCH KLATKI
PIERSIOWEJ W ASPEKCIE MOŻLIWOŚCI APLIKACJI STRUKTUR
PRZESTRZENNYCH WYTWARZANYCH METODAMI PRZYROSTOWYMI**
***ANALYSIS OF CHEST PROTECTORS AND BALLISTIC SHIELDS IN TERMS
OF THE POSSIBILITY OF USING SPATIAL STRUCTURES
PRODUCED WITH ADDITIVE METHODS***

Piotr FOTYGA, piotr.fotyga@pcosa.com.pl, ORCID: 0009-0005-7800-2959
Przemysłowe Centrum Optyki S.A. – *Industrial Centre of Optics S.A.*

Mariusz MAGIER, mariusz.magier@pw.edu.pl, ORCID: 0000-0002-4431-9537
Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Technologiczny

Faculty of Mechanical and Industrial Engineering, Warsaw's University of Technology, Poland

DOI 10.5604/01.3001.0054.6672

Streszczenie: Celem pracy była analiza wybranych konstrukcji dwóch typów osłon: ochraniaczy klatki piersiowej dla motocyklistów oraz lekkich, osobistych osłon balistycznych, w zakresie zastosowanych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych. W dalszej części pracy przeanalizowano, na podstawie przeglądu literatury, wybrane koncepcje struktur przestrzennych, dedykowanych pochłanianiu kinetycznej energii uderzenia. Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano wnioski dotyczące możliwości opracowania i przebadania struktur przestrzennych wytwarzanych metodami przyrostowymi, stanowiących ochronę klatki piersiowej oraz kończyn przed oddziaływaniem bodźców kinetycznych, generowanych dla prędkości uderzenia od 130 km/h do ok. 1300 km/h.

Słowa kluczowe: ochraniacz, protektor, osłona osobista, oddziaływanie kinetyczne, struktury przestrzenne, wytwarzanie przyrostowe

1. Wstęp

Zarówno w aplikacjach militarnych, jak i cywilnych osłony wrażliwych części ciała ludzkiego stanowią istotny element ochronny, minimalizujący możliwość wystąpienia rozle-

Abstract: The aim of the article was to analyze selected designs of two types of shields: chest protectors for motorcyclists and light, personal ballistic shields, in terms of the materials and design solutions used. In the further part of the article, selected concepts of spatial structures dedicated to absorbing the kinetic impact energy were analyzed based on a literature review. Basing on the analyses, conclusions were drawn regarding the possibility of developing and testing spatial structures produced using additive technologies, protecting the chest and limbs against the kinetic impact generated at velocity from 130 km/h up to 1300 km/h.

Keywords: protector, personal shield, kinetic impact, spatial structures, additive manufacturing

1. Introduction

Protecting shields of sensitive parts of human body belong to essential components minimizing extensive injuries of organs which can happen at kinetic energy

głych uszkodzeń organów ciała w wyniku oddziaływania energii kinetycznej.

W przypadku służb mundurowych (np. wojsko, policja, staż graniczna) głównymi elementami ochronnymi głowy i klatki piersiowej są hełmy (kaski) i kamizelki kuloodporne, zapewniające (na odpowiednio dobranych poziomach ochrony balistycznej) takie wyhamowanie pocisku bez penetracji, aby chroniona część ciała nie doznała uszkodzeń np. prowadzących do utraty świadomości [1], [2]. W przypadku hełmu jest to graniczna wartość przyspieszenia oddziałująca na głowę (w pracy [3] oszacowano, że prawdopodobieństwo pęknięcia czaszki wynosi 5% dla przyspieszenia w piku o wartości 180 [g] i 40% dla przyspieszenia w piku o wartości 250 [g]), zaś w przypadku kamizelki jest to jej maksymalne ugięcie nie przekraczające dopuszczalnych wartości zgodnie z normami (np. [4] – 40 [mm] czy [5] – 44 [mm]).

Analogicznie dla aplikacji cywilnych tego typu osłon np. takich jak kierowcy motocykli, głównymi elementami ochrony kierowcy są kask i ochraniacz klatki piersiowej [6], chroniące motocyklistę podczas upadku (zderzenia).

Oczywiście zasadniczą wielkością różnicującą zjawiska uderzenia pocisku i zderzenia kierowcy dla w/w aplikacji tego typu osłon jest prędkość, którą jako przykładową dla poruszającego się pojazdu motocyklowego można przyjąć jako 130 km/h (36,1 m/s), a dla pocisku pistoletowego około 1300 km/h (ok. 361 m/s).

2. Charakterystyka wybranych konstrukcji ochraniaczy dla motocyklistów oraz lekkich, osobistych osłon balistycznych

Funkcją kamizelki kuloodpornej jest ochrona ciała człowieka przed skutkami uderzenia pocisku wystrzelonego z broni strzeleckiej poprzez pochłanianie i rozpraszanie jego energii kinetycznej. Przegląd istniejących rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych wkładów balistycznych stosowanych obecnie w kamizelkach kuloodpornych pokazuje, że warstwowe układy

impacts both in military and civilian applications.

In the case of uniform forces (e.g. military, police, border guard) the main components protecting the head and chest are helmets (crash helmets) and bulletproof jackets providing (for suitably matched levels of ballistic protection) such deceleration of a bullet, and preventing any penetration, that a protected part of the body cannot suffer any injuries, e.g. causing a loss of consciousness [1], [2]. In the case of helmet it is a limiting value of acceleration acting to the head (in [3] an estimation is provided that the likeness of skull break is 5% for peak acceleration 180 [g], and 40% for peak acceleration 250 [g]), whereas in the case of a jacket it is its maximal deflection not crossing the values accepted in the standards (e.g. [4] – 40 [mm], or [5] – 44 [mm]).

Analogously, for civilian applications of this kind such as e.g. motorcycle drivers the main components of driver's protection include the crash helmet and chest shield [6], protecting the rider during a fall (collision).

Of course, the basic parameter distinguishing between the effects of bullet impact and driver's collision in the applications of the above mentioned shields is the velocity which can be taken for instance as 130 km/h (36.1 m/s) for motorcycles, and ca. 1300 km/h (ca. 361 m/s) for pistol bullets.

2. Characteristics of Selected Designs of Protectors for Motorcyclists and Light Personal Ballistic Shields

The bulletproof jacket is functionally aimed to protect the human body against the impact effects of a bullet fired with a firearm through the absorption and dissipation of its kinetic energy. A review of existing material-designing solutions of ballistic inserts used in the bulletproof jackets indicates that the laminated material systems

materiałowe [7], [8], [9] na przykład ceramiczne [10], [11] ceramiczno-kompozytowe [6, 7, 14, 9] lub wykonane segmentów tytanowych [10,11] i polietylenu [12,13], stanowią skuteczną ochronę przed działaniem pocisków wystrzelanych z broni strzeleckiej. Tego rodzaju osłona ma zabezpieczyć najważniejsze organy wewnętrzne człowieka. Jest to ok. 0.5 m² powierzchni, którą należy szczególnie chronić [20]. Należy także zauważyć, iż podczas zatrzymywania pocisku w przypadku kamizelek elastycznych [5], ich ugięcie jest zauważalnie większe niż w przypadku osłon twardych [5]. Ugięcia tego typu, mogą spowodować złamania kości i/lub uszkodzenia narządów wewnętrznych [21]. Dlatego bardzo istotne jest aby kamizelka kuloodporna, oprócz zatrzymania pocisku i rozproszenia jego energii, możliwie jak najbardziej ograniczała ugięcie podczas trafienia pociskiem. Przykładami kamizelek kuloodpornych elastycznych, mogą być takie opracowania krajowe jak np. KKP-01-B, prod. MASKPOL S.A. (rys. 1), lub SIGMA, prod. LUBAWA S.A. (rys. 2).

[7], [8], [9], for instance ceramic [10], [11] ceramic-composite [6,7, 14, 9], or made of titanium segments [10,11] and polyethylene [12,13], create the efficient protection against action of bullets fired with the small arms. The shield of such kind is aimed to safe the most important inner human organs. It constitutes the area of ca. 0.5 m² which has to be specially protected [20]. It has to be also noted that at arresting a bullet the elastic jacket [5] deflects more significantly than for rigid shields [5]. Such deflections may cause the fractures of bones and/or the injuries of inner organs [21]. For this reason, it is essential that the bullet-proof jacket, beside arresting the bullet and dissipation of its energy, can also reduce the bending at hitting by the bullet. There are examples of bulletproof elastic jackets developed by country manufacturers such as KKP-01-B produced by MASKPOL S.A. (Fig. 1), or SIGMA produced by LUBAWA S.A. (Fig. 2).



Rys. 1. Kamizelka kuloodporna KKP-01-B, prod. MASKPOL S.A. [22]

Fig. 1. Bulletproof jacket KKP-01-B, produced by MASKPOL S.A. [22]

Biorąc pod uwagę powyższe informacje, ważnym jest rozwój kamizelek kuloodpornych ze względu na ciągły postęp inżynierii materiałowej [24, 16, 17]. Na przykładzie



Rys. 2. Kamizelka kuloodporna SIGMA, prod. LUBAWA S.A. [22]

Fig. 2. Bulletproof jacket SIGMA, produced by LUBAWA S.A. [22]

Considering the above information it is important to observe the progress of bullet-proof jackets designs due to steady advance of material engineering [24, 16, 17]. Basing

rozwoju kamizelek [27] będzie to zmierzało do zwiększenia powierzchni chronionej a tym samym do poszukiwania nowych rozwiązań materiałowych, które będą efektywne pod względem masowości jak i zwiększonego limitu balistycznego.

W przypadku ochraniaczy motocyklowych, istnieją dwie podstawowe funkcje ochronne: ochrona przed tarcieniem (np. podczas upadku z rozpędzonego motocykla), oraz ochrona ciała człowieka poprzez pochłanianie i rozpraszanie energii kinetycznej uderzenia. W niniejszej analizie skupiono się jednak na zagadnieniu ochrony przed uderzeniami. Charakterystyka uderzeń, na jakie wystawiony jest motocyklista, jest inna niż w przypadku kamizelek kuloodpornych. W większości przypadków, uderzenia nie mają charakteru penetrującego i są rozproszone na większej powierzchni ciała niż pociski, których to energia uderzenia skupia się punktowo. Ochraniacze powyższego typu wykonane są z szeroko pojętej grupy polimerów, w tym np. poliuretany, czy kopolimery winylu i etylenu [28]. W związku z powyższym, ochraniacze motocyklowe są zauważalnie sztywniejsze niż przedstawione powyżej modele kamizelek kuloodpornych, w związku z czym częściowo ograniczają one ruchy motocyklisty. Oprócz tego, energia którą ochraniacze mają za zadanie zaabsorbować jest znacznie mniejsza niż w przypadku kamizelek kuloodpornych, co nie generuje tak dużych ugięć w trakcie uderzenia.

Należy również zwrócić uwagę wpływ ochraniaczy na kwestie komfortu termicznego motocyklisty. Otóż ochraniacze, szczególnie te wykonane z materiałów o strukturze gąbczastej, znacząco ograniczają cyrkulację powietrza, tworząc pewnego rodzaju barierę pomiędzy ciałem motocyklisty, a wierzchnią warstwą odzieży. Taki stan znacząco utrudnia to odprowadzanie wilgoci, oraz utrzymanie temperatury ciała na odpowiednim poziomie.

on examples of jackets developments [27] the progress could be focused on the increase of protected area and by the same on a search of new material solutions which would be efficient for mass production and for increased ballistic limits.

In the case of motorcycle protectors there are two basic protecting functions: protection against friction (e.g. at falling down with moving motorcycle), and protection of human body by absorption and dissipation of kinetic energy of the impact. Presented study is focused on questions of protection against the impacts. Characteristics of impacts threatening the motorcyclist is different than for the bulletproof jackets. In most cases the impacts have not-penetrating character and are scattered over a larger area of body opposite to bullets with hitting energy concentrated in points. The protectors of the above kind are made of a widely represented group of polymers, including for instance polyurethanes, or copolymers of vinyl or ethylene [28]. The motorcycle protectors are noticeably more rigid than the models of bulletproof jackets presented above and for that reason they partially restrict the movements of the motorcyclist. Apart of that, the energy which has to be absorbed by the protectors is significantly lower than in the case of bulletproof jackets what generates much lower deflections at impacts.

Moreover, the attention has to be paid into the influence of the protectors on the questions of motorcyclist's thermal comfort. The protectors, and especially those made from materials with a spongy structure, significantly limit the air circulation by creating a specific barrier between motorcyclist body and an outer layer of clothes. Such situation largely jeopardises disposal of the wet and maintenance of body temperature at required level. Regarding the mentioned above, there

Mając na uwadze powyższe, głównymi wyzwaniami związanymi z konstrukcją ochraniaczy motocyklowych są: elastyczność ochraniaczy oraz zapewnienie odpowiedniej cyrkulacji powietrza. Przykładami ochraniaczy motocyklowych mogą być: ochraniacz kolan Furygan prod. D3O [29] (rys. 3), lub ochraniacz pleców Seesoft RV prod. REV'IT [30] (rys. 4).



Rys. 3. Ochraniacz kolan Furygan prod. D3O [29]

Fig. 3. Knee protector Furygan produced by D3O [29]

Biorąc pod uwagę powyższe wyzwania, dotyczące elastycznych kamizelek kuloodpornych oraz ochraniaczy motocyklowych, już dzisiaj rozwiązaniem mogą być z powodzeniem aplikacje stosowane z technologii przyrostowych [31]. Technologie przyrostowe w ostatnim czasie nabrały tempa rozwoju zwłaszcza w medycynie [32] ale także w innych gałęziach przemysłu dzięki szerokiej gamie możliwości metod wytwarzania przyrostowego [33].

3. Charakterystyka wybranych koncepcji struktur przestrzennych, dedykowanych pochłanianiu kinetycznej energii uderzenia

Technologie addytywne umożliwiają wytwarzanie trójwymiarowych obiektów w oparciu o cyfrowy model przestrzenny o złożonej

are following challenges connected with the designs of motorcycle protectors: elasticity of protectors, and securing a suitable air circulation. Following motorcycle protectors may be used as examples: knee protector Furygan produced by D3O [29] (Fig. 3), or back protector Seesoft RV produced by REV'IT [30] (Fig. 4).



Rys. 4. Ochraniacz pleców Seesoft RV prod. REV'IT [30]

Fig. 4. Back protector Seesoft RV produced by REV'IT [30]

Considering the above mentioned challenges, referring to the elasticity of bullet-proof jackets and motorcyclist protectors, the applications offered by additive technologies may be a satisfying solution of today [31]. The additive technologies have been developing with greater pace in recent times, especially in medicine [32], but also in other branches of industry, as they offer a wide spectrum of possibilities in additive methods of production [33].

3. Characteristics of Selected Concepts on Spatial Structures Dedicated to Impact Kinetic Energy Absorption

Additive technologies can be used to production of three dimensional objects on the base of a digital spatial model of com-

geometrii w krótszym czasie niż obecnie dostępne technologie konwencjonalne, z wykorzystaniem szerokiej gamy materiałów, takich jak polimery, ceramika i metale [34], [33], [35]. Technologie addytywne znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, m.in. w motoryzacji, lotnictwie, medycynie, a także w przemyśle obronnym [36].

W obecnej fazie rozwoju technologicznego istotne znaczenie ma czas pomiędzy zaprojektowaniem produktu o pożądanym parametrach, a rozpoczęciem produkcji masowej. Wymaga to modyfikacji istniejących ram projektowania, produkcji i testowania, w których główny nacisk położony jest na eksperymentowanie z różnorodnymi rozwiązaniami poprzez symulacje komputerowe i szybkie prototypowanie. Podejście to określa się mianem technologii kompresji czasu (TCT) [37]. Do technik przyspieszających produkcję zalicza się przede wszystkim Rapid Prototyping (szybkie wytwarzanie rzeczywistych prototypów maszyn i urządzeń) [38], Rapid Manufacturing (szybka produkcja seryjna) [39] oraz Rapid Tooling (szybkie wytwarzanie narzędzi) [40], które realizowane są głównie poprzez produkcję przyrostową, potocznie zwaną drukiem 3D.

Kolejną zaletą stosowania technik addytywnych jest możliwość wprowadzenia nowatorskich procedur w projektowaniu produktu, ułatwiają opracowywanie produktów, które są trudne lub całkowicie niemożliwe w wytwarzaniu przy użyciu konwencjonalnych technik odlewania, obróbki plastycznej, obróbki cieplnej, cięcia i powlekania. Technologie przyrostowe są uznawane za kluczowe dla zrównoważonego rozwoju gospodarczego i uważane są za zorientowane na przyszłość innowacyjne metody produkcji, szczególnie w świetle szeroko akceptowanego w branży podejścia „Zero odpadów”.

Rozpoczynając analizę wybranych koncepcji struktur przestrzennych wytwarzanych metodami przyrostowymi, zwrócono uwagę przede wszystkim na nasze krajowe doświad-

plex geometry within a shorter time than provided by now available conventional technologies, and at the use of a wide spectrum of materials, such as polymers, ceramics, and metals [34], [33], [35]. Additive technologies found applications in many branches of industry, for instance in car production, in aviation, medicine, and in defence industry [36].

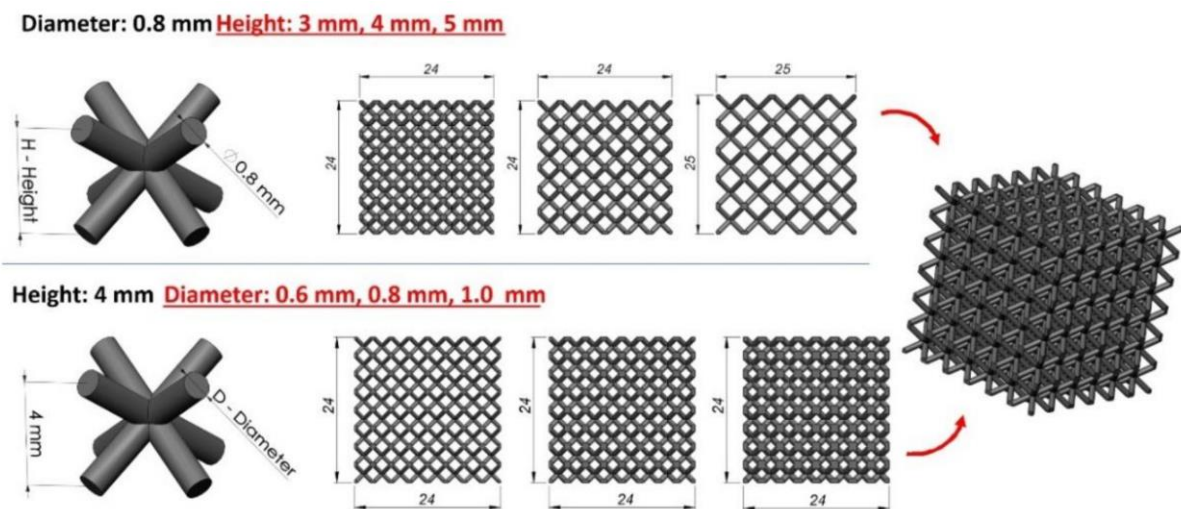
Time needed for starting the mass production after designing an article with demanded parameters is essential in the present phase of technological development. It requires a modification of frames on designing, production and testing processes to put the main stress on experimental trials of different solutions through computer simulations and a rapid prototyping. Such approach is named as a time compression technology (TCT) [37]. There are following main techniques accelerating the production: Rapid Prototyping of real machines and devices [38], Rapid Manufacturing in serial production [39], and Rapid Tooling (rapid production of tools) [40], exploiting in general the additive production, commonly named as 3D printing.

A next advantage of additive techniques is a possibility for introduction of innovative procedures on product designing facilitating development of new products which are difficult or impossible for fabrication with the use of conventional techniques of casting, plastic and thermal processing, cutting and covering. The additive technologies are crucial for balanced economic development, and are deemed to be the future oriented innovative methods of production, especially considering an approach of “Zero Wastes” which is widely accepted in the branch.

At the start of an analysis of selected concepts of spatial structures produced by additive methods the attention was firstly

czenia w tym zakresie. W pracy [41] badano regularne struktury kratowe o różnych rozmiarach komórek elementarnych i średnicach rozpórek zaprojektowane i wyprodukowane przy użyciu proszku metalicznego SS316L w procesie SLM (selective laser melting) (rys. 5). Główny nacisk przeprowadzonych badań był związany z określeniem właściwości mechanicznych zarówno w warunkach obciążenia quasi-statycznego, jak i dynamicznego.

paid to our country experience over that domain. In the work [41] were investigated the regular grating structures with different sizes of designed elementary cells and diameters of bars and produced with the use of metallic powder SLM (selective laser melting) (Fig. 5). Performed investigations were focused on identification of the mechanical performance both for the quasi-static and dynamic loads.



Rys. 5. Założenia geometryczne przyjęte w procesie wytwarzania próbki w pracy [41]
Fig. 5. Geometric specifications accepted for the process of sample production in work [41]

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono m.in., że należy kontynuować badania parametrów procesu technologicznego umożliwiające doskonalenie struktur komórkowych oraz redukcję strukturalnych i mikrostrukturalnych niedoskonałości. Dodatkowo, w celu zdefiniowania, należy przeprowadzić badania numeryczne reakcji mechanicznych próbek struktur komórkowych w szerokim zakresie geometrycznym. Materiały o strukturze kratowej wykonane z SS316L są obiecujące do zastosowania jako nowe lekkie konstrukcje materiałowe o wysokich właściwościach mechanicznych. Można je potencjalnie wykorzystać w dalszych nowatorskich rozwiązaniach jako produkty w wielu dziedzinach przemysłu.

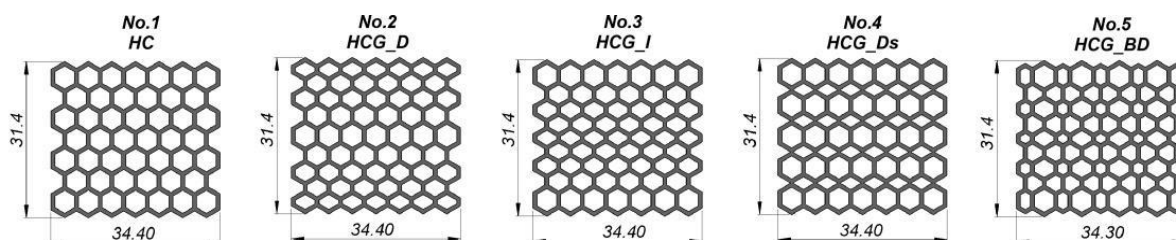
W pracy [42] autorzy dokonali analizy

On the grounds of performed investigations it was stated among others that the parameters of technological process have to be still investigated to improve the cellular structures and reduce the structural and microstructural defects. In addition, the numerical researches have to be conducted over the mechanical reactions of samples of the cellular structures for a wide geometrical range. Materials with the grating structure produced of SS316L can be promising in applications for new light material structures with high mechanical performance. They can be potentially used in the future innovative solutions for the articles in many branches of industry.

The authors of work [42] studied the

procesu deformacji regularnej struktury komórkowej w warunkach obciążenia quasi-statycznego. Wykonano badanie wykonalności, badania wytrzymałościowe materiału bazowego oraz badania eksperymentalne oraz numeryczne badania kompresji opracowanych regularnych struktur komórkowych (rys.6). Badane struktury w formie plastra miodu oraz kolejnych czterech wariantów ze stopniowo zmieniającymi się topologiami o różnych wartościach gęstości względnej zostały zaprojektowane i wyprodukowane z elastycznego termoplastycznego poliuretanu TPU-Polyflex przy użyciu technologii wytłocznego osadzania termoplastów (FFF).

process of deformation of a regular cellular structure in conditions of quasi-static loads. Investigations were performed over the feasibility and the resistance of the basic material together with experimental and numerical tests over the compression of developed regular cellular structures (Fig. 6). The investigated structures in a honeycomb form, and four successive variants with gradually changing topologies and different values of the relative density, were designed and produced from elastic thermoplastic polyurethane TPU-Polyflex using a technology of pressed deposition of thermoplastics (FFF).



Rys. 6. Widok główny opracowanych próbek konstrukcji o różnych topologiach [42]

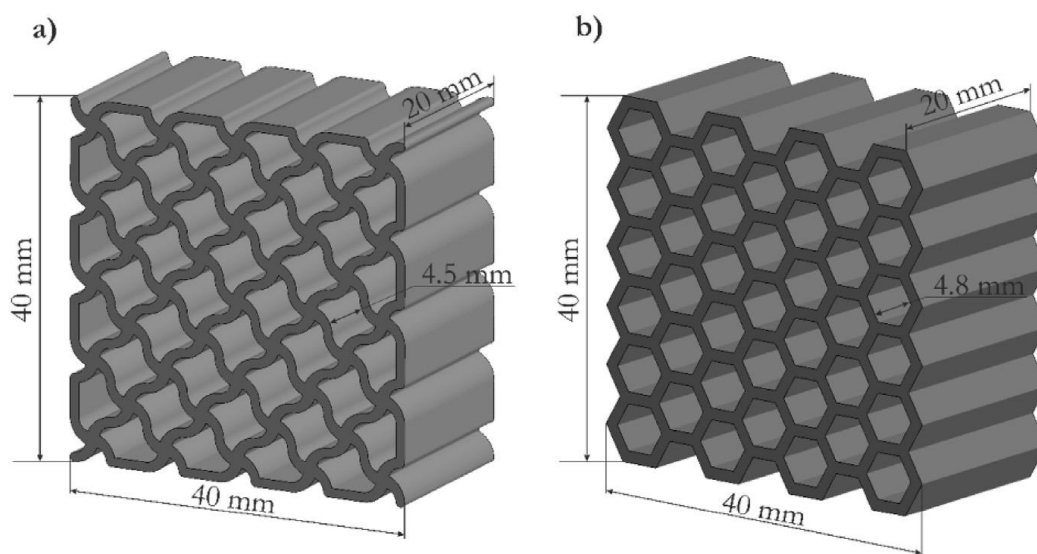
Fig. 6. General view of prepared samples of structures with different topologies [42]

Na podstawie wyników badań, zdefiniowano efektywne parametry druku 3D dla termoplastycznego włókna poliuretanowego. Stwierdzono, że wydrukowany w 3D Polyflex materiał charakteryzuje się bardzo dużą elastycznością (wydłużenie do 380%) oraz nieliniowym rozkładem naprężenia-odkształcenia. Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano metodę elementów skończonych (FE) oraz program Ls Dyna. Symulacje odzwierciedlały reakcję mechaniczną próbek konstrukcyjnych poddanych działaniu quasi-statycznemu ścisania. Wyniki uzyskane na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych wykazały dużą zgodność z danymi z eksperymentalnych testów ścisania. Znalaziono zależność liniową pomiędzy gęstością względną a maksymalną wartością energii odkształcenia.

On the base of testing results the efficient parameters of 3D printing were defined for thermoplastic polyurethane fibre. It was stated that the material printed in 3D Polyflex is characterised by very high elasticity (elongation to 380%) and non-linear pattern of stress-strain. The method of finite elements (FE) and computer code Ls Dyna were used for calculations. Simulations reflected mechanical reaction of structural samples subject to action of quasi-static compression. Results received on the base of performed computer simulations showed great compliance with data from experimental compression tests. A linear dependence between the relative density and the maximal energy of strain was found.

Autorzy pracy [43] analizowali różne warianty struktur kratownicowych z materiału SS 316L o stopniowo zmieniających się topologiach (dyskretne, wzrostowe i malejące), które zostały zaprojektowane i wytworzone addytywną metodą selektywnego stapiania laserowego i poddane badaniom mikrostruktury, oraz ścisania pod obciążeniem quasi-stacycznym i dynamicznym (rys.7). Ponadto zbadano związek pomiędzy gęstością względną konstrukcji a zdolnością absorpcji energii.

Authors of work [43] studied different variants of grating structures made of SS 316L material with gradually changing topologies (discrete, increasing and decreasing) which were designed and fabricated by the additive method of laser fusion and subject to investigations of microstructure, and compression under a quasi-static and dynamic loads (Fig.7). Moreover, the relation was investigated between the structure relative density and the energy absorption capacity.



Rys. 8. Badane dwie struktury komórkowe: a) spirala, b) plaster miodu [44]

Fig. 8. Two investigated cellular structures: a) spiral, b) honeycomb [44]

W zakresie badań struktur komórkowych, wytwarzanych technologią przyrostową, w pracy [44] autorzy badali proces deformacji regularnych struktur komórkowych wytworzonych z materiału ABS za pomocą technologii wytłocznego osadzania termoplastów FDM (Fused Depositon Modeling) (rys. 8). Dwie różne topologie o podobnych gęstościach względnych zostały poddane ścisaniu dla pięciu różnych prędkości odkształcenia: quasi-stacycznego i dynamicznego.

Dodatkowo obie topologie porównano w zakresie absorpcji energii. Zbadano właściwości mechaniczne próbek materiałów drukowanych w 3D oraz oceniano i numerycznie kore-

In the frame of investigations described in work [44] over the cellular structures produced by additive technology the authors examined the process of deformation of the regular cellular structures fabricated from ABS material by technology of FDM (Fused Depositon Modelling) (Fig. 8). Two different topologies with similar relative densities were subject to compression at five different rates of straining: quasi-static and dynamic.

Moreover, the two topologies were compared for absorption of energy. Mechanical properties of samples of materials printed in 3D were investigated, and eval-

lowano z danymi doświadczalnymi dla różnych szybkości odkształceń.

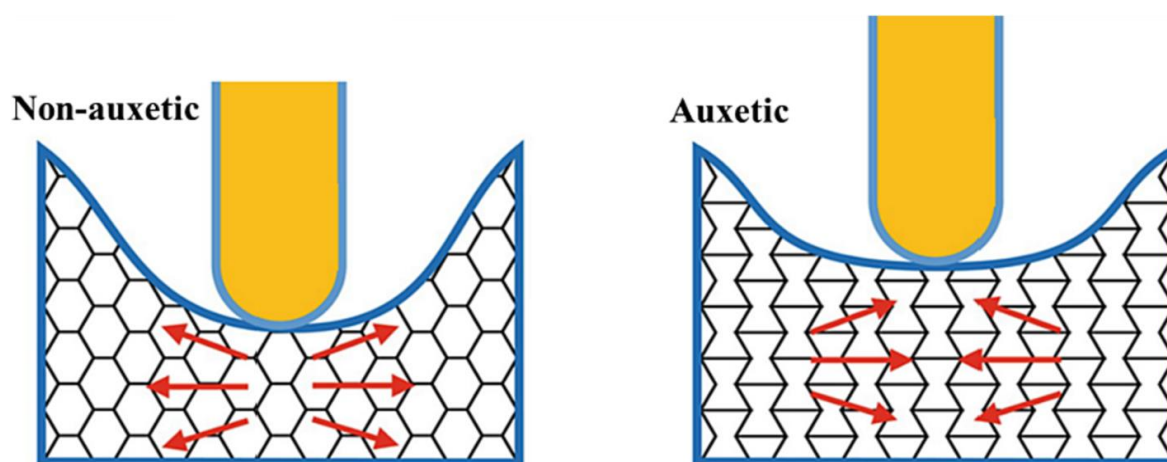
W tym celu wybrano model konstytutywny sprężysto-lepko-plastyczny i wyznaczono parametry Cowpera-Symonds'a przy użyciu autorskiego skryptu MATLAB-a, co ostatecznie zaowocowało uzyskaniem dobrej zgodności wyników obliczeń i eksperymentu dla wszystkich rozważanych stanów obciążenia.

Praca [45] przedstawia przegląd metamateriałów strukturalnych o ujemnym współczynniku Poissona. W porównaniu do konwencjonalnych struktury auksetyczne wykazują kilka doskonałych właściwości, w tym wyższą absorpcję energii, zwiększoną odporność na odkształcenia i ulepszone właściwości mechaniczne. W rezultacie powstają struktury auksetyczne, zyskują popularność jako lekkie, wysokowydajne konstrukcje ochronne odporne na obciążenia wybuchowe i udarowe (rys. 9).

uated and numerically correlated with experimental data at different rates of strains.

For this reason a constitutive elastic-viscosity-plastic model was selected and parameters of Cowper-Symonds' were established using original MATLAB's handbook what finally provided a good compliance of calculation and experiment results for all considered conditions of loads.

The work [45] presents a review of structural metamaterials with a negative Poisson's coefficient. The auxetic structures represent some interesting properties such as a higher absorption of energy, increased resistance to deformations, and improved mechanical characteristics. In effect, the created auxetic structures become popular as the light and highly efficient protecting structures resistant to the loads of explosion and impact (Fig. 9).

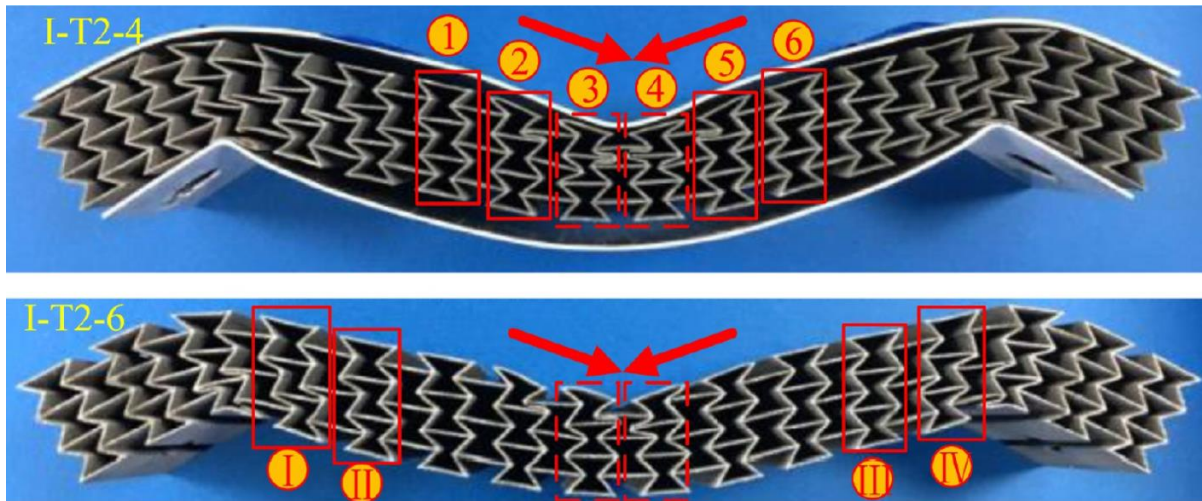


Rys. 9. Odporność na wgniecenie struktury auksetycznej w porównaniu do standardowej struktury komórkowej[45]

Fig. 9. Resistance to declination for an auxetic structure compared to a standard cellular structure [45]

W artykule przedstawiono także metody oceny skuteczności działania „przeciwbalistycznego”. Oceniono że struktura typu „sandwich” z wkładem auksetycznym zapewnia lepszą ochronę, niż równoważna konwencjonalna płyta balistyczna (rys.10).

The paper also describes the methods assessing the effectiveness of “anti-ballistic” action. It was stated that “sandwich” type structure with an auxetic insert provides a better protection than an equivalent conventional ballistic plate (Fig.10).



Rys. 10. Odształcenia płyty warstwowej z wkładem auksetycznym mocowanej pod wpływem uderzenia balistycznego [45]

Fig. 10. Deformations of a fixed layered plate with an auxetic insert subject to ballistic impact [45]

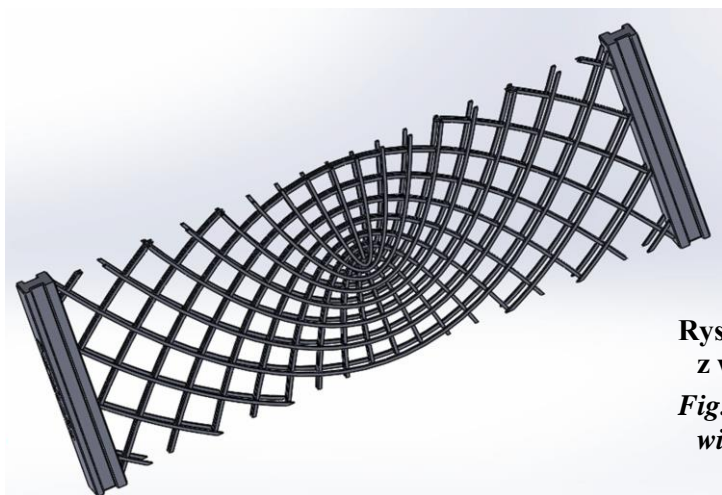
Ponieważ ujemny współczynnik Poissona struktur auksetycznych jest proporcjonalny do objętości materiału w strefie uderzenia, więc im większa jest wartość ujemnego współczynnika Poissona tym bardziej korzystne „łagodzenie” miejscowego obciążenia. W porównaniu do równoważnych konwencjonalnych konstrukcji ochronnych, wszystkie badane struktury ochronne oparte na auksetykach charakteryzowały się wyższą wartością pochłaniania energii i bardziej efektywnym „łagodzeniem” siły dynamicznej. Struktury auksetyczne umożliwiają globalną deformację prowadzącą do stosunkowo równomiernego rozkładu obciążenia dynamicznego na chronionym obiekcie. Ponadto badania wykazały, że wkład auksetyczny wypełniony pianką był skuteczniejszy w łagodzeniu skutków oddziaływania ładunków wybuchowych niż pusty auksetyczny „plaster miodu”.

Pozostając przy metamateriałach, wytwarzanych w technologiach przyrostowych, należy wspomnieć o pracy [46], w której autorzy badali zachowanie konstrukcji pantograficznych z czopami (przegubami elastycznymi), przy dużych odształceniach, a na podstawie przeprowadzonych eksperymentów zaobserwowali du-

As the negative Poisson’s coefficient of auxetic structures is proportional to the capacity of material in the impact zone, then the higher values of Poisson’s negative coefficient provide a better “alleviation” of local loads. Comparing with the equivalent conventional protecting designs, all investigated protecting structures based on the auxetics were characterised by a higher value of energy absorption and more effective “alleviation” of dynamic force. Due to a global deformation the auxetic structures can provide a relatively equal pattern of dynamic loads in protected object. Moreover, the tests have indicated that the auxetic insert filled with foam was more efficient in relieving the effects of explosive charges action than the empty auxetic “honeycomb”.

Regarding metamaterials produced in additive technologies it has to be mentioned about work [46] where the authors have investigated the behaviour of pantographic designs with pivots (elastic joints) at high deformations and noticed a high range of elasticity and specific mechanisms of bulging

ży zakres sprężystości i specyficzne mechanizmy wyboczeniowe (rys. 11). Według autorów prezentowane wyniki są obiecujące, gdyż na ich podstawie stwierdzili, że można wytwarzać metamateriały o wyższym gradiencie przy użyciu mikrostruktur o mikrocharakterystycznych długościach rzędu dziesiątych części milimetra.

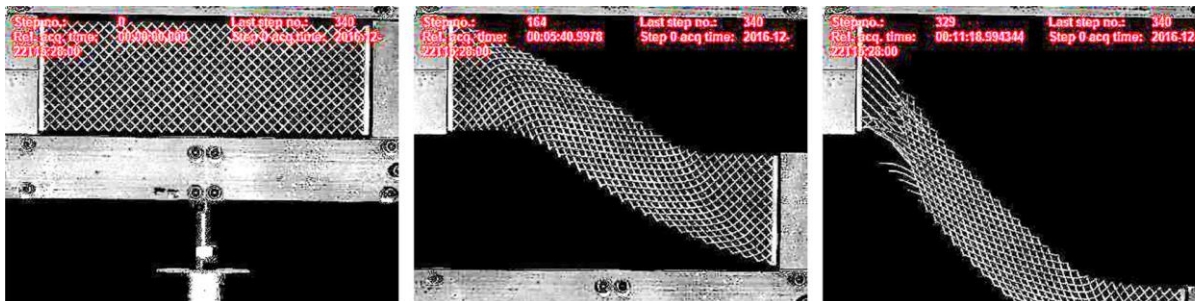


Rys. 11. Projekt płyty pantograficznej z włóknami parabolicznymi [46]

Fig. 11. Design of pantographic plate with parabolic fibres

W podobnej pracy [47] autorzy omówili eksperymentalne wyniki w odniesieniu do badań obciążenia ścinającego z kontrolowanym przemieszczeniem, przy dużych odkształceniach konstrukcji pantograficznych. Analizowano pięć próbek o różnej wielkości aż do pierwszego pęknięcia. Wyniki to pokazały, że charakter odkształceń jest silnie nieliniowy, a struktury mogą ulegać dużym sprężystym odkształceniom bez osiągnięcia całkowitego zniszczenia (rys. 12).

In similar work [47] the authors discussed the experimental results regarding tests on shearing loads with controlled displacement at great deformations of pantographic designs. Five samples of different size were analysed until the first breaking. The results demonstrated that the character of deformations is highly nonlinear and the structures can subject to large elastic deformations without reaching a point of complete destruction (Fig. 12).



Rys. 12. Przykładowe zdjęcia próbki A obciążanej aż do pęknięcia [47]

Fig. 12. Exemplary picture of sample A subject to loads until breaking [47]

4. Podsumowanie

Przedstawiona problematyka konstrukcji ochroniaczy dla motocyklistów oraz lekkich, osobistych osłon balistycznych w zestawieniu z przeglądem wybranych koncepcji struktur przestrzennych, dedykowanych pochłanianiu kinetycznej energii uderzenia, wytwarzanych metodami przyrostowymi, tworzą istotę przedmiotu nowej pracy badawczej, związanej z zastosowaniem przestrzennych struktur komórkowych (kratownicowych), auksetycznych czy pantograficznych w lekkich konstrukcjach ochronnych.

W pierwszym, cywilnym aspekcie problemu, należałoby rozpatrzyć potrzebę opracowania ochroniaczy z strukturami przestrzennymi dedykowanymi pochłanianiu energii kinetycznej, przeznaczonych dla ochrony klatki piersiowej dla prędkości (zderzeń komunikacyjnych) około 130 km/h.

W drugim, militarnym wariantcie rozwiązania, problem dotyczyłby doboru konstrukcji przestrzennej warstwy wewnętrznej modułu balistycznego, pochłaniającej możliwie największą część energii kinetycznej, którą oddaje pocisk o prędkości 1300 km/h na warstwach balistycznych, co umożliwiłoby jak największą redukcję wielkości ugięcia modułu, minimalizując prawdopodobieństwo złamań kości klatki piersiowej czy poważnych uszkodzeń organów wewnętrznym.

Z powyższego wynika, że skala różnic przyjętych prędkości w obu w/w wariantach ochrony klatki piersiowej jest dziesięciokrotna, co skutkować będzie koniecznością zastosowania różnych metodyk badawczych i materiałów, z których wytwarzane będą struktury przestrzenne w formie wewnętrznych wkładów ochroniaczy lub kamizelek kuloodpornych.

Kierunki i wyniki dalszych prac badawczych zostaną przedstawione w kolejnych publikacjach.

4. Summary

Presented questions on designs of protectors for motorcyclists and light, personal ballistic shields, combined with the review of selected concepts of spatial structures dedicated to absorption of kinetic energy of an impact, produced by additive methods create the essence of a new research project connected with application of spatial cellular structures (crating-like), auxetic or pantographic ones, in the light protecting designs.

In the first civilian aspect of the problem it would be sensible to consider a need for development of protectors with spatial structures dedicated to absorption of kinetic energy and predicted for protection of the chest at velocities ca. 130 km/h (communication collisions).

In the second, military variant of the solution, the problem could concern the selection of a spatial design for inner layer of ballistic module absorbing part of kinetic energy transferred by a bullet with velocity 1300 km/h to the ballistic layers to provide possibly highest reduction of module deflection and minimisation of probability for chest bones fractures, or serious injures of inner organs.

The above shows that the tenfold scale of differences for accepted velocities in two variants of chest protection was taken causing the need for application of different testing methodologies and materials used for fabrication of spatial structures in the form of inner inserts for protectors or bulletproof jackets.

Directions and results of further research work will be presented in successive publications.

Literatura / Literature

- [1] P. D. . LIDÉN, E. M.Sc.; BERLIN, R. M.D., PH.D.; JANZON, B. M.Sc., PH.D.; SCHANTZ, B. V.M.D., PH.D.; SEEMAN, T. M.D., “Some Observations Relating to Behind-body Armour Blunt Trauma Effects Caused by Ballistic Impact.,” *J. Trauma Inj. Infect. Crit. Care*, vol. 28(1), pp. S145–S148, 1988, [Online]. Available: https://journals.lww.com/jtrauma/abstract/1988/01001/some_observations_relating_to_behind_body_armour.29.aspx
- [2] A. W. Carroll and C. A. Soderstrom, “A New Nonpenetrating Ballistic Injury,” *Ann. Surg.*, vol. 188, pp. 753–757, 1978.
- [3] H. J. Mertz, P. Prasad, A. L. Irwin, H. J. Mertz, P. Prasad, and A. L. Irwin, “Injury Risk Curves for Children and Adults in Frontal and Rear Collisions,” *SAE Tech. Pap.*, Nov. 1997, doi: 10.4271/973318.
- [4] “PN-V-87000:2011 „Osłony balistyczne lekkie. Kamizelki kulo- i odłamkoodporne. Wymagania i badania.”.
- [5] U. Department of Justice, O. of Justice Programs, and N. Institute of Justice, “Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06”, Accessed: May 21, 2024. [Online]. Available: www.ojp.usdoj.gov/nij
- [6] “Ochroniacze pleców, tłumienie uderzeń (EN 1621-2).” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: [https://www.laboratuar.com/pl/testler/motosikletci-koruma-ekipmani-testleri/sirt-koruyucular-darbe-zayiflamasi-\(en-1621-2\)/](https://www.laboratuar.com/pl/testler/motosikletci-koruma-ekipmani-testleri/sirt-koruyucular-darbe-zayiflamasi-(en-1621-2)/)
- [7] J. Pach, P. Mayer, K. Jamroziak, S. Polak, and D. Pyka, “Experimental analysis of puncture resistance of aramid laminates on styrene-butadiene-styrene and epoxy resin matrix for ballistic applications,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 1327-1337., 2019, doi: 10.1016/j.acme.2019.07.004.
- [8] S. Clifton, B. H. S. Thimmappa, R. Selvam, and B. Shivamurthy, “Polymer nanocomposites for high-velocity impact applications-A review,” *Compos. Commun.*, vol. 17, no. August 2019, pp. 72–86, 2020, doi: 10.1016/j.coco.2019.11.013.
- [9] Z. Benzait and L. Trabzon, “A review of recent research on materials used in polymer–matrix composites for body armor application,” *J. Compos. Mater.*, vol. 52, no. 23, pp. 3241–3263, 2018, doi: 10.1177/0021998318764002.
- [10] I. G. Crouch, “Critical interfaces in body armour systems,” 2020, doi: 10.1016/j.dt.2020.11.006.
- [11] M. Fejdyś, K. Kośła, A. Kucharska-Jastrzębek, and M. Łandwijt, “Hybride composite armour systems with advanced ceramics and ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibres,” *Fibres Text. East. Eur.*, vol. 24, no. 3, pp. 79–89, 2016, doi: 10.5604/12303666.1196616.
- [12] F. S. da Luz, F. da C. G. Filho, M. S. Oliveira, L. F. C. Nascimento, and S. N. Monteiro, “Composites with natural fibers and conventional materials applied in a hard armor: A comparison,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 9, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3390/POLYM12091920.
- [13] M. Fejdyś, K. Kośła, A. Kucharska-Jastrzębek, and M. Łandwijt, “Influence of ceramic properties on the ballistic performance of the hybrid ceramic–multi-layered UHMWPE composite armour,” *J. Aust. Ceram. Soc.*, 2020, doi: 10.1007/s41779-020-00516-7.
- [14] A. Kurzawa *et al.*, “Assessment of the impact resistance of a composite material with EN AW-7075 matrix reinforced with α -Al₂O₃ particles using a 7.62 x 39 mm projectile,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 3, pp. 1–22, 2020, doi: 10.3390/ma13030769.
- [15] A. Kurzawa, D. Pyka, K. Jamroziak, M. Bocian, P. Kotowski, and P. Widomski, “Analysis of

- ballistic resistance of composites based on EN AC-44200 aluminum alloy reinforced with Al₂O₃ particles,” *Compos. Struct.*, vol. 201, no. August 2017, pp. 834–844, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.06.099.
- [16] S. Y. Chusov and V. P. Yankov, “Investigation of Properties of Titanium Alloys with Mechanically Stable Beta-Structure for Body Armor Application,” pp. 54–57, 2009.
- [17] S. J. Cimpoeru, S. J. Alkemade, M. Szymczak, N. L. Rupert, W. H. Green, and J. M. Wells, “Ballistic assessment of a low-cost Ti-6Al-4V titanium alloy,” *Aust. J. Mech. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 5–9, 2003, doi: 10.1080/14484846.2003.11464459.
- [18] M. Karahan, A. Jabbar, and N. Karahan, “Ballistic impact behavior of the aramid and ultra-high molecular weight polyethylene composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 34, no. 1, pp. 37–48, 2015, doi: 10.1177/0731684414562223.
- [19] A. A. Shtertser, B. S. Zlobin, V. V. Kiselev, S. D. Shemelin, and P. A. Bukatnikov, “Characteristics of Reinforced Ultra-High Molecular Weight Polyethylene During Its Ballistic Penetration,” *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, vol. 61, no. 3, pp. 471–478, 2020, doi: 10.1134/S0021894420030190.
- [20] K. Jamroziak, “Evaluation of gunshot wounds in aspect of injury criterion,” *Aktual. Probl. Biomech.*, vol. 11, pp. 33–46, 2016.
- [21] J. Pinkos, Z. Stempień, and A. Smędra, “Experimental analysis of ballistic trauma in a human body protected with 30 layer packages made of biaxial and triaxial Kevlar® 29 fabrics,” *Def. Technol.*, vol. 21, pp. 73–87, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.DT.2022.07.004.
- [22] “Kamizelka kuloodporna KKP-01-B – Produkty specjalne - Maskpol - producent sprzętu ochronnego dla Wojska.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.maskpol.com.pl/produkty-specjalne/kamizelka-kuloodporna-kkp-01-b>
- [23] “KAMIZELKA KULOODPORNA SIGMA.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://lubawa.com.pl/pl/ochrona-indywidualna/kamizelki-kuloodporne/kamuflowane-wewnetrzne/kamizelka-kuloodporna-sigma>
- [24] L. Wang, S. Kanesalingam, R. Nayak, and R. Padhye, “Recent Trends in Ballistic Protection,” *Text. Light Ind. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 0, p. 37, 2014, doi: 10.14355/tlist.2014.03.007.
- [25] P. Baranowski *et al.*, “Deformation of honeycomb cellular structures manufactured with Laser Engineered Net Shaping (LENS) technology under quasi-static loading: Experimental testing and simulation,” *Addit. Manuf.*, vol. 25, no. September 2018, pp. 307–316, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2018.11.018.
- [26] P. Szymczyk-Ziółkowska, V. Hoppe, G. Ziółkowski, M. Smolnicki, and M. Madeja, “The effect of geometry on mechanical properties of Ti6Al4V ELI scaffolds manufactured using additive manufacturing technology,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 20, Feb. 2020, doi: 10.1007/s43452-020-0011-y.
- [27] P. D. Kenneth Horn, Kimberlie Bieber, Kenneth Burkman and A. Sheikh, Lewis Jamison, Michael Kolb, “Lightening body armor : Arroyo support to the Army response to Section 125 of the National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2011,” Report No. W74V8H-06-C-0001; United States Army: Santa Monica, USA, 2011.
- [28] L. Madej-Kiełbik, K. Koślakośła, D. Zielińska, E. Chmal-Fudali, and M. Maciejewska, “Effect of Accelerated Ageing on the Mechanical and Structural Properties of the Material System Used in Protectors,” 2019, doi: 10.3390/polym11081263.
- [29] “Furygan D3O Ghost lvl 2 - protektor/ochraniacz łokci/kolan.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://motozbrojownia.pl/protektory-do-odziezy-motocyklowej/4706-r-furygan-d3o-ghost-lvl-2-protektorochraniacz-lokciokolan.html>
- [30] “Ochraniacz pleców REV’IT! Seesoft RV | sklep-revit.pl.” Accessed: May 27, 2024. [Online].

- Available: <https://sklep-revit.pl/product-pol-50315-Ochroniacz-plecow-REVIT-Seesoft-RV.html>
- [31] M. Kristoffersen, M. Costas, T. Koenis, V. Brøtan, C. Paulsen, and T. Børvik, “On the ballistic perforation resistance of additive manufactured AlSi10Mg aluminium plates,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 137, p. 103476, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103476.
 - [32] D. Garcia-Gonzalez, A. Rusinek, T. Jankowiak, and A. Arias, “Mechanical impact behavior of polyether-ether-ketone (PEEK),” *Compos. Struct.*, vol. 124, pp. 88–99, 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2014.12.061.
 - [33] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
 - [34] A. Antolak-Dudka *et al.*, “Static and Dynamic Loading Behavior of Ti6Al4V Honeycomb Structures Manufactured by Laser Engineered Net Shaping (LENSTM) Technology,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 8, 2019, doi: 10.3390/ma12081225.
 - [35] M. Costas, D. Morin, M. de Lucio, and M. Langseth, “Testing and simulation of additively manufactured AlSi10Mg components under quasi-static loading,” *Eur. J. Mech. - A/Solids*, vol. 81, p. 103966, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.euromechsol.2020.103966.
 - [36] P. Zochowski *et al.*, “Ballistic impact resistance of bulletproof vest inserts containing printed titanium structures,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 2, 2021, doi: 10.3390/met11020225.
 - [37] P. Zawadzki and K. Żywicki, “Smart Product Design and Production Control for Effective Mass Customization in the Industry 4.0 Concept,” *Manag. Prod. Eng. Rev.*, vol. 7, Feb. 2016, doi: 10.1515/mpcr-2016-0030.
 - [38] D. Kongre, D. Sherekar, D. Akare, and P. Bhagat, “Manufacturing of Components using Rapid Prototyping: A Review,” *Int. J. Sci. Res. Sci. Technol.*, pp. 739–745, Feb. 2023, doi: 10.32628/IJSRST523102102.
 - [39] J. Hanssen, Z. Moe, D. Tan, and O. Chien, “Rapid Prototyping in Manufacturing,” 2015, pp. 2505–2523. doi: 10.1007/978-1-4471-4670-4_37.
 - [40] A. Equbal, A. K. Sood, and M. Shamim, “Rapid tooling: A major shift in tooling practice,” *Manuf. Ind. Eng.*, vol. 14, Feb. 2015, doi: 10.12776/mie.v14i3-4.325.
 - [41] P. Płatek, J. Sienkiewicz, J. Janiszewski, and F. Jiang, “Investigations on Mechanical Properties of Lattice Structures with Different Values of Relative Density Made from 316L by Selective Laser Melting (SLM),” *Mater. 2020, Vol. 13, Page 2204*, vol. 13, no. 9, p. 2204, May 2020, doi: 10.3390/MA13092204.
 - [42] P. Płatek *et al.*, “Deformation Process of 3D Printed Structures Made from Flexible Material with Different Values of Relative Density,” *Polym. 2020, Vol. 12, Page 2120*, vol. 12, no. 9, p. 2120, Sep. 2020, doi: 10.3390/POLYM12092120.
 - [43] J. Sienkiewicz, P. Płatek, F. Jiang, X. Sun, and A. Rusinek, “Investigations on the Mechanical Response of Gradient Lattice Structures Manufactured via SLM,” *Met. 2020, Vol. 10, Page 213*, vol. 10, no. 2, p. 213, Feb. 2020, doi: 10.3390/MET10020213.
 - [44] M. Kucewicz, P. Baranowski, M. Stankiewicz, M. Konarzewski, P. Płatek, and J. Małachowski, “Modelling and testing of 3D printed cellular structures under quasi-static and dynamic conditions,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 145, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.TWS. 2019. 106385.
 - [45] R. P. Bohara, S. Linforth, T. Nguyen, A. Ghazlan, and T. Ngo, “Anti-blast and -impact performances of auxetic structures: A review of structures, materials, methods, and fabrications,” *Eng. Struct.*, vol. 276, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2022.115377.
 - [46] M. Golaszewski, R. Grygoruk, I. Giorgio, M. Laudato, and F. Di Cosmo, “Metamaterials with relative displacements in their microstructure: technological challenges in 3D printing,

experiments and numerical predictions,” *Contin. Mech. Thermodyn.*, vol. 31, no. 4, pp. 1015–1034, Jul. 2019, doi: 10.1007/S00161-018-0692-0.

- [47] E. Barchiesi, G. Ganzosch, C. Liebold, L. Placidi, R. Grygoruk, and W. H. Müller, “Out-of-plane buckling of pantographic fabrics in displacement-controlled shear tests: experimental results and model validation,” *Contin. Mech. Thermodyn.*, vol. 31, no. 1, pp. 33–45, Jan. 2019, doi: 10.1007/S00161-018-0626-X.

