

dr inż. MARCIN JACHOWICZ (ORCID: 0000-0002-6402-6897)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: majac@ciop.lodz.pl

DOI: 10.5604/01.3001.0013.7300

# Nowe technologie w projektowaniu środków ochrony indywidualnej chroniących głowę

Fot. HalfPoint/Bigstockphoto



Bardzo często w czasie pracy lub podczas uprawiania sportu człowiek jest narażony na wiele zagrożeń, z których do najniebezpieczniejszych należą urazy głowy. Nie jesteśmy w stanie całkowicie ich wyeliminować, więc aby je zminimalizować, stosuje się różnego rodzaju środki ochrony. Ich projektowanie i konstrukcja nieustannie zmienia się i ewoluuje, a parametry ochronne są ściśle dobierane do przewidywanych zagrożeń. W budowie hełmów stosowane są nowe materiały i rozwiązania techniczne, które mają na celu zwiększenie bezpieczeństwa człowieka i komfortu użytkowania, a także zmniejszanie masy hełmu i podniesienie jego funkcjonalności. Takie cele można osiągnąć głównie dzięki zastosowaniu nowoczesnego oprogramowania do projektowania i symulacji zachowania się, np. podczas amortyzacji uderzenia lub poprzez wykorzystanie materiałów amortyzacyjnych o specjalnie dobranej charakterystyce tłumienia.

W artykule przedstawiono nowoczesne metody projektowania i symulacje komputerowe zachowania się opracowanych modeli hełmów ochronnych podczas amortyzacji uderzenia. Scharakteryzowano również materiały amortyzacyjne o specjalnie dobranej charakterystyce siła – odkształcenie, zapewniające zarówno właściwości ochronne, jak i użytkowe.

*Słowa kluczowe: hełmy ochronne, materiały amortyzacyjne, ciecz nienewtonowska, projektowanie CAD, MES*

## New technology in the development of personal equipment protecting head

Very often while working or playing sports a person is exposed to a many hazards. One of the most dangerous threats is head injuries. We are not able to eliminate them completely. To minimize them, various types of head protection are used. Their design and construction are constantly changing and evolving, and the protective parameters are closely matched to the anticipated threats. New materials and technical solutions are used in the construction of helmets, which are aimed at increasing human safety and comfort of use, as well as reducing weight and increasing its functionality. Such goals can be achieved mainly thanks to the use of modern design software and simulation of behavior e.g. during shock absorption or by using shock absorbing materials with specially selected damping characteristics.

This article contains information on modern design methods and computer simulation of the behavior of developed models of protective helmets during shock absorption. Shock absorbing materials with specially selected strength-deformation characteristics were also presented. These materials also provide high protective and functional properties.

*Keywords: protective helmets, shock-absorbing materials, non-Newtonian liquids, CAD design, FEM*

## Wstęp

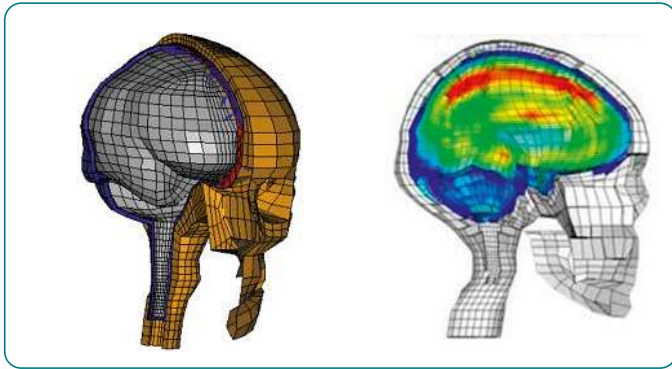
Głowa jest częścią ciała człowieka, której urazy mogą powodować bardzo poważne skutki zdrowotne. Jedną z najczęściej stosowanych metod jej zabezpieczenia w czasie wykonywania pracy jest używanie odpowiednio zaprojektowanych środków ochrony indywidualnej, np. hełmów ochronnych. Podobne środki zabezpieczające stosuje się podczas uprawiania sportów.

Ciągły rozwój metod projektowania i sposobów symulacji zachowania się modeli hełmów ochronnych podczas amortyzacji uderzenia oraz postęp w dziedzinie materiałoznawstwa, dają możliwość podniesienia stopnia ochrony i efektywności nowoczesnych środków ochrony indywidualnej (ŚOI). W celu zwiększenia zakresu ochrony producenci wyposażają je np. w specjalne elementy amortyzacyjne. Podstawowym parametrem charakteryzującym takie elementy jest ich zdolność do pochłaniania energii uderzenia, czyli amortyzacji siły przekazanej na ciało człowieka. Na elementy amortyzacyjne najczęściej stosuje się: polistyren, poliuretan spieniony, gumę mikroporowatą, gumę spienioną, mieszkankę PVC i nitylu itp. Podniesienie stopnia zabezpieczenia głowy powoduje zwiększenie masy i gabarytów sprzętu, ogranicza wentylację i zmniejsza komfort użytkowania.

Możliwości przestrzennego projektowania i modelowania komputerowego oraz symulacji obciążeń mechanicznych, cieplnych, itp.<sup>1</sup> pozwalają na znaczne rozwinięcie obszaru wiedzy, związanej nie tylko z projektowaniem elementów pochłaniających energię uderzenia, ale także pozostałych elementów hełmów, takich jak skorupa czy więźba [1-6].

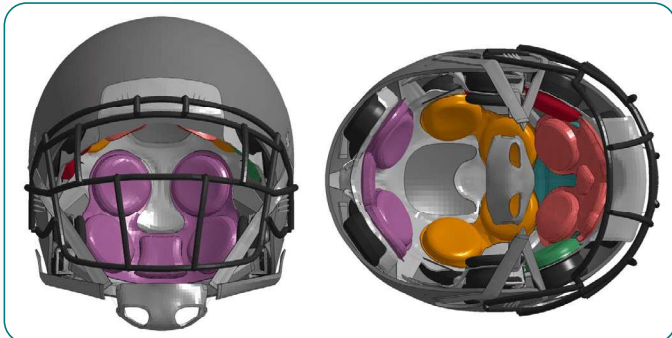
Wykorzystywanie nowoczesnych materiałów amortyzacyjnych, np. o charakterystyce cieczy nienewtonowskiej, pozwala na połączenie takich cech, jak wysoki stopień amortyzacji i wysoki komfort użytkowania. Jest to możliwe dzięki nieliniowej zależności naprężenia stycznego od szybkości ścinania w odniesieniu do takich materiałów. Z jednej strony gwarantuje to użytkownikowi wygodę podczas normalnego użytkowania ŚOI,

<sup>1</sup><http://www.solidworks.com>.



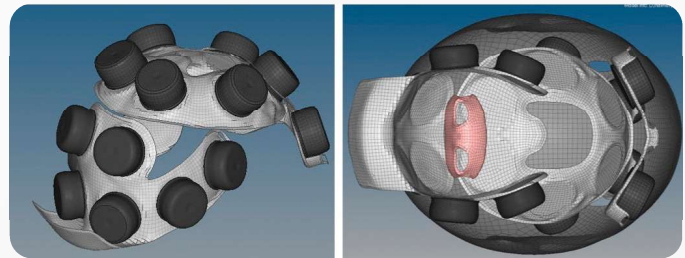
Rys. 1. Model MES (metoda elementów skończonych) i naprężenia wewnątrz czaszki podczas uderzenia [10]

Fig. 1. FEM model (finite elements method) and internal skull stress during impact [10]



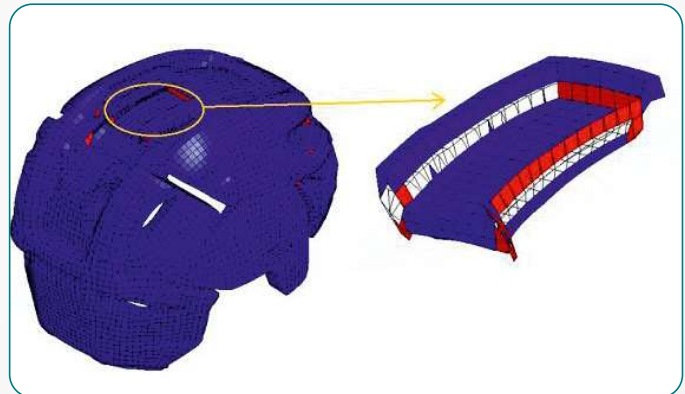
Rys. 3. Model MES (metoda elementów skończonych) zaprojektowanego hełmu [11]

Fig. 3. FEM model (finite elements method) of the helmet [11]



Rys. 2. Model MES (metoda elementów skończonych) – elementy amortyzacyjne umieszczone w skorupie hełmu [11]

Fig. 2. FEM model (finite elements method) – shock-absorbing elements placed in the shell of the helmet [11]



Rys. 4. Model MES (metoda elementów skończonych) – skorupa hełmu z wydzieloną częścią na element pochłaniający energię uderzenia [12]

Fig. 4. FEM model (finite elements method) – helmet shell with recess for an element absorbing impact energy [12]

ponieważ naciski na materiał amortyzacyjny są niewielkie – zachowuje on możliwość uginania się i miękkość w kontakcie z głową użytkownika. Z drugiej strony, w sytuacji dynamicznego uderzenia w kask, wykładzina amortyzacyjna znacznie zwiększa swoją sztywność i amortyzuje uderzenie, zapewniając bezpieczeństwo.

Kolejną cechą materiałów o charakterystyce cieczy nienewtonowskiej jest to, że mogą one zachowywać się jak ciała stałe (nazywamy je wtedy materiałami spienionymi), odkształcając się i pękając, lub płynąc – jak ciecze [7]. Opis ich wykorzystania w celu tworzenia nowych rozwiązań w projektowaniu środków ochrony indywidualnej chroniących głowę, a także opis nowych technologii, stosowanych w tym kontekście, jest celem artykułu.

### Projektowanie hełmów przy użyciu oprogramowania CAD i symulacje komputerowe z wykorzystaniem MES

Obecnie, w większości przedsiębiorstw, coraz częściej w przygotowaniu produkcji hełmów wykorzystuje się oprogramowanie typu CAD (ang. *computer aided design*) i analizę MES (metoda elementów skończonych). Pomagają one zoptymalizować wymiary, masę, dobrać najkorzystniejszy materiał oraz spełnić ściśle określone wymagania konstruktorskie, które dopuszczają badany element do użytkowania<sup>2</sup> [8,9].

<sup>2</sup> <http://www.knse.pl/publikacje/65.pdf>

Podczas projektowania hełmów korzysta się z najnowszej wiedzy na temat urazów mechanicznych, mechanizmów wstrząsu mózgu itp. Analizie może zostać poddane oddzielnie zjawisko urazów mózgu na skutek uderzenia. Przykładowy model naprężeń wewnątrz czaszki podczas uderzenia (w część twarzową), wykonany metodą elementów skończonych, przedstawiono na rys. 1. Na podstawie założeń wstępnych opracowana zostaje od podstaw konstrukcja hełmu ochronnego (rys. 2.). Począwszy od kształtu skorupy, więźby i elementów amortyzacyjnych, dobierane zostają wstępnie specyfikacje materiałowe w odniesieniu do wszystkich elementów.

Powstały model (rys. 3.) zostaje poddany analizom komputerowym pod kątem jego reakcji na rzeczywiste siły, które mogą wystąpić podczas amortyzacji uderzenia. Na tym etapie możliwa jest ingerencja we wszystkie parametry projektu, począwszy od geometrii, konstrukcji, zastosowanego materiału aż po warunki brzegowe symulacji. Otrzymane w taki sposób wyniki pozwalają zoptymalizować konstrukcję hełmu jeszcze na etapie przygotowania produkcji, co oszczędza czas i pieniądze producenta. Taki sposób postępowania powoduje, że np. możliwa jest ingerencja w skorupę i wydzielenie w niej oddzielnego elementu pochłaniającego energię (rys. 4.).

Przykładem takiego postępowania, w wyniku którego powstał hełm ochronny dla leśników, jest

kask Ranger z modułem crashbox<sup>3</sup>. Crashbox to zintegrowany, dwuścienny system absorpcji uderzeń, umieszczony w górnej części hełmu (rys. 5.), który przeznaczony jest do pochłaniania energii uderzenia w przypadku uderzenia z góry.

Osiąga się to poprzez specjalnie zaprojektowane cylindryczne pręty w kształcie wyciętego walca. W momencie uderzenia wciskają się one do odpowiadających im elementów, wykonując jednocześnie ruch obrotowy. Taki mechanizm pochłania energię i minimalizuje siłę przekazywaną na głowę użytkownika.

### Materiały (płyny) amortyzacyjne o charakterystyce cieczy nienewtonowskiej

Materiały amortyzacyjne o charakterystyce cieczy nienewtonowskiej zostały wykorzystane w pierwszej kolejności w wojsku i w sporcie. Już pod koniec XX oraz na początku XXI wieku zaczęto stosować rozwiązania technologiczne oparte na technologii „inteligentnych molekuł”. Najczęściej bazą nowoczesnych materiałów o charakterystyce cieczy nienewtonowskich stosowanych w inżynierii są polimery. Zbudowane są z molekuł, które pod działaniem niewielkich sił i obciążeń swobodnie się poruszają. Jednak w wyniku gwałtownego uderzenia poszczególne molekuly zbliżają się do siebie i łączą (rys. 6.), [13].

<sup>3</sup> <https://www.alphasolway.com/ranger-safety-helmet>.

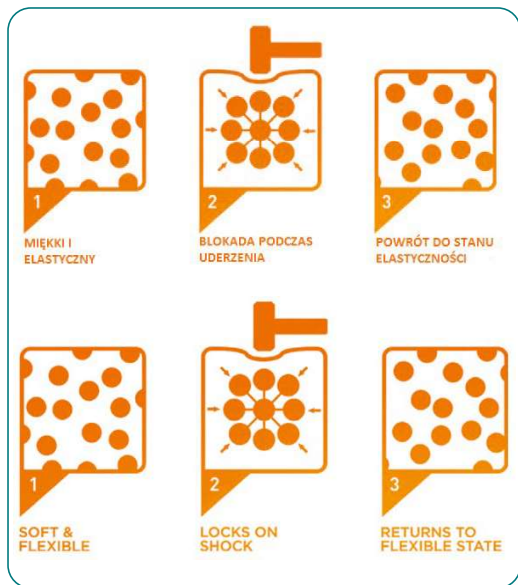




Rys. 5. Kask Ranger z modułem crashbox

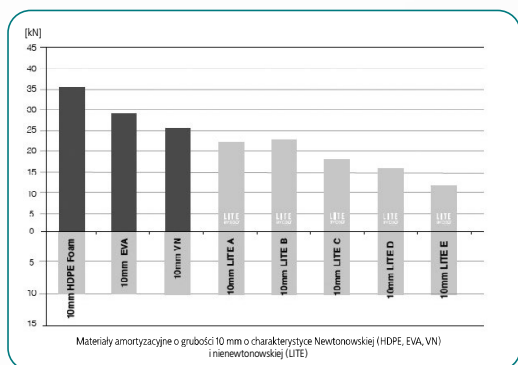
Fig. 5. Ranger helmet with a crashbox module

Źródło: <https://www.alphasolway.com/ranger-safety-helmet>



Rys. 6. Mechanizm działania materiału o charakterystyce cieczy nienewtonowskiej [13]

Fig. 6. The action of a material with non-Newtonian fluid characteristics [13]



Rys. 7. Porównanie sił przeniesionych na kowadło dla materiałów amortyzacyjnych o grubości 10 mm o charakterystyce Newtonowskiej (HDPE, EVA, VN) i nienewtonowskiej (LITE)

Fig. 7. Comparison of the forces transferred to the anvil for shock-absorbing materials 10 mm thick with Newtonian (HDPE, EVA, VN) and non-Newtonian (LITE) characteristics

Źródło: [www.d3o.com](http://www.d3o.com)

Taka konstrukcja powoduje, że np. element amortyzacyjny zachowuje elastyczność podczas noszenia, zaś przy uderzeniu w niego twardnieje, tworząc warstwę ochronną. Ponadto takie materiały charakteryzują się kilkukrotnie lepszym

parametrem absorpcji wstrząsów niż dwa razy grubsza pianka poliuretanowa czy EVA (kopolimer etylenu i octanu winylu), (rys. 7.). Dzięki temu dyskomfort podczas ich użycia jest niewielki – wkładki amortyzacyjne dobrze dopasowują się do ciała użytkownika, a przy tym są dość lekkie. Wśród produktów oferowanych na rynku już teraz można spotkać wkładki wykonane z materiałów o charakterystyce nienewtonowskiej dla służb mundurowych w postaci np. ochraniaczy kolan i łokci oraz wkładów amortyzacyjnych, a także w medycynie, np. do ochrony kości biodrowych [14, 15].

Tego typu materiały są najczęściej miękkie, elastyczne i lekkie. Mogą być formowane w zależności od ich końcowego zastosowania, a także wielokrotnie powracać do pierwotnej postaci po użyciu bez uszkodzeń. Mogą występować w dwóch podstawowych postaciach: piankowej i plastycznej.

Materiały o budowie piankowej doskonale nadają się na elementy chroniące przed uderzeniem. Wiele z nich posiada dobre właściwości amortyzacyjne, a powietrze zamknięte w komorach znacząco zmniejsza gęstość materiału. W 1999 roku brytyjscy inżynierowie, dr Phil Green i Richard Palmer odkryli materiał, który może być wytwarzany w postaci spienionej i posiada charakterystykę cieczy nienewtonowskiej. Założyli następnie firmę D3O Lab, aby opracować i wprowadzić na rynek produkty ochronne przeznaczone dla sportowców i żołnierzy [16, 17]. Materiał D3O został skomercjalizowany w 2006 r., a w 2009 r. Ministerstwo Obrony Wielkiej Brytanii przyznało D3O Lab 100 000 funtów na dopasowanie kasków wojskowych w celu zmniejszenia energii kinetycznej pocisku lub szrapnela podczas uderzenia, z uwagi na jego wyjątkowe właściwości [18].

Opatentowany materiał amortyzacyjny powstał na bazie poliuretanu wzbogaconego o dodatki pomagające w pochłanianiu energii, głównie polyborododimetylosiloxane [19, 20]. Poliborododimetylosiloksan to substancja zwana dilatantem, która w stanie niepoddanym wymuszeniom zewnętrznym przepływa swobodnie, ale po uderzeniu blokuje się, aby absorbować i rozpraszać energię jako ciepło. Materiał handlowy znany jako D3O jest więc kompozytem z pianki poliuretanowej o zamkniętych komórkach z poliborododimetylosiloksanem (PBDMS) jako dylatantem zdyspergowanym przez matrycę piankową [19], co powoduje, że rozprasza więcej energii niż zwykły poliuretan przy jednakowych poziomach energii. W patencie podano optymalne proporcje dla kompozytów piankowych wchodzących w skład pianki amortyzującej: objętościowo, 15-35% PBDMS i 40-70% CO<sub>2</sub> (gaz powstały w wyniku procesu spieniania to dwutlenek węgla), pozostałą część stanowi poliuretan [21]. Technologia D3O znajduje już zastosowanie w wielu obszarach takich jak wojsko, sport, motoryzacja, medycyna. Powstają zarówno gotowe wyroby w postaci ochronników kończyn, jak i półwyroby (rys. 8.).

Materiały o budowie plastycznej opracowano już podczas II wojny światowej. Głównymi jego składnikami były kwas borowy i olej silikonowy [22, 23]. Powstały nietoksyczny „syntetyczny kauczuk” mógł rozciągać się jak guma, a po odbiciu odskakiwał, był odporny na pleśń i miał bardzo wysoką temperaturę topnienia. Jednak substancja nie posiadała wszystkich właściwości potrzebnych do zastąpienia gumy [24], w związku z tym jego produkcja nie była rozwijana. Dopiero pod koniec XX wieku dostrzeżono w nim potencjał i w związku z tym, że podobnie jak materiały piankowe posiada charakterystykę cieczy nienewtonowskiej, zaczęto go stosować jako materiał amortyzacyjny. Pozwala na to fakt, że materiał ten zbudowany jest z molekuł, które poddane niewielkim (o małej dynamice) naciskom zachowują się jak plastelina i dają się dowolnie kształtować (rys. 9.). Jednak w wyniku gwałtownego uderzenia, poszczególne molekuły zbliżają się do siebie i łączą tworząc twarde, sprężyste materiały, który zachowuje się jak kauczuk.

Materiał jest produkowany przez kilka firm (np. 3DO, Crayola, DowCorning), które modyfikują skład w taki sposób, aby uzyskać założone parametry. Niezwykła charakterystyka płynięcia Silly Putty wynika z głównego składnika jaki jest używany do jego produkcji – polidimetylosiloksanu (PDMS), substancji lepkosprężystej. Dokładniej skład takiego materiału może wyglądać następująco: 65% hydroksydymetylosiloksanu, 17% krzemionki (kryształiczny kwarc), 9% Thixatrol ST (olej rycynowy pochodna), 4% polidimetylosiloksanu, 1% dekametylotetrasiloksanu cyklopentasiloksanu, 1% gliceryny i 1% dwutlenku tytanu [25].

## Podsumowanie

Obecnie na rynku szeroko dostępne są środki ochrony indywidualnej, służące do ochrony głowy, przeznaczone do odpowiednio wybranej aktywności fizycznej. Poza zachowaniem wysokich parametrów ochronnych, zapewniają one wysoki komfort użytkowania, a także posiadają modny i nowoczesny wygląd. Sytuacja taka została osiągnięta dzięki wykorzystaniu nowoczesnej technologii z zakresu projektowania, symulacji komputerowych oraz „inteligentnych” materiałów amortyzacyjnych. Zastosowanie oprogramowania typu CAD (projektowanie wspomaganie komputerowo) i symulacji MES (metoda elementów skończonych) pozwala we wczesnej fazie produkcji sprawdzić i przetestować zachowanie się kilkunastu modeli konstruowanych hełmów.

Możliwe jest wprowadzanie istotnych zmian nie tylko w postaci odmiennego kształtu wyrobu, ale również zastosowanego materiału. Do produkcji wszelkiego rodzaju sprzętu ochronnego coraz chętniej stosuje się specjalnie dobrane materiały amortyzacyjne o charakterystyce cieczy nienewtonowskiej, które przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniej amortyzacji oferują wysoki komfort użytkowania. Dzięki temu możliwa jest produkcja szerokiej gamy wysokiej jakości sprzętu ochronnego, nowoczesnie zaprojektowanego.



Rys. 8. Gotowe wyroby i półprodukty z materiałem D3O: a) – ochronnik kończyny, b) – płyty „sztywne”, c) – płyty „miękkie”

Fig. 8. Finished products and semi-finished products made of D3O materials: a) – limb protector, b) – “rigid” plates, c) – “soft” plates

Źródło: www.d3o.com



Rys. 9. Różne formy materiału plastycznego: a), b) – umożliwia dowolne formowanie, c) – pozostawiony bez ruchu „wypłylnie” przez otwór

Fig. 9. Various forms of plastic material; a), b) – allows any forming, c) – leaving without movement, it “flows out” through the hole

Źródło: [https://en.wikipedia.org/wiki/Silly\\_Putty](https://en.wikipedia.org/wiki/Silly_Putty)

wanego, o wysokich parametrach ochronnych i niewygórowanej cenie.

Czytelników zainteresowanych szczegółami związanymi z projektowaniem i badaniami kasków ochronnych zapraszamy do odwiedzenia serwisu internetowego CIOP-PIB ([www.ciop.pl](http://www.ciop.pl)), gdzie są umieszczone materiały informacyjne opracowane w ramach prowadzonych w Instytucie zadań badawczych, dotyczących projektowania, symulacji komputerowych i stosowania nowoczesnych materiałów amortyzacyjnych wszystkich rodzajów środków ochrony indywidualnej, w tym także chroniących głowę.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] QURESHI, N., FAROOQ, M. A., REHMAN, M., TARIQ, S. Advanced simulations of gas meter components. Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering, T. IV, 2011.
- [2] SKRZAT, A. Modelowanie liniowych i nieliniowych problemów mechaniki ciała odkształcalnego i przepływów ciepła w programie ABAQUS [Modelling linear and non-linear problems of deformed body mechanics and heat streams with the use of ABAQUS software], Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2010.
- [3] NAKHIMOVSKI, I. Contributions to the Modeling and Simulation of Mechanical Systems with Detailed Contact Analysis, Linköping Studies in Science and Technology Dissertation No. 1009, Linköping 2006.
- [4] WILLIAM, B., ZIMMERMAN, J. Process Modelling and Simulation with Finite Element Methods, Series on Stability, Vibration and Control of Systems, Series A, Volume 15, UK 2004
- [5] SZALA, J. Metody doświadczalne w zmęczeniu materiałów i konstrukcji [Experimental methods in material and construction fatigue]. Wydawnictwo Uczelniane ATR Bydgoszcz 2000.

[6] DIETRICH, M. Podstawy Konstrukcji Maszyn, tom 1-3. WNT, 2007.

[7] MATRAS, Z. Podstawy mechaniki płynów i dynamiki przepływów cieczy nienewtonowskich [The basics of liquid mechanics and Non-Newtonian liquid flow dynamics]. Politechnika Krakowska, Kraków 2006.

[8] GABRYSZEWSKI, Z. Teoria sprężystości i plastyczności [Theory of elasticity and flexibility]. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001.

[9] JONIAK, S. Badania eksperymentalne w wytrzymałości materiałów [Experimental research on the constitution of materials]. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.

[10] KLEIVEN, S. Evaluation of head injury criteria using a finite element model validated against experiments on localized brain motion, intracerebral acceleration, and intracranial pressure, International Journal of Crashworthiness, 11 (1):65-79, January 2006

[11] <https://www.wearable-technologies.com/2018/05/fe-models-a-new-engineering-resource-for-football-helmet-design>.

[12] RIGONI, I. FE-Modelling and Material Characterization of Ice-Hockey Helmet. In degree project medical engineering, second cycle, 30 credits, Stockholm Sweden 2017.

[13] GIERZYŃSKA-DOLNA, M. Biotribologia. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.

[14] MAKLEWSKA, E., DEMUS, J., KRUCIŃSKA, I., MATYJEWSKI, M. Comparison analysis of shock-absorbing properties of materials used in impact protectors. Fibres & Textiles in Eastern Europe, 2002, January/March, s. 81-84.

[15] ŁUCZYŃSKI, W., REDLICH, G., FORTUNIAK, K., OBERSZTYN, E. Przegląd materiałów charakteryzujących się zdolnością tłumienia energii [A review of materials characterized as able to suppress energy]. Techniczne Wyroby Włókiennicze, R. 14, nr 1/2, s. 15-18, 2006.

[16] KAMENEV, M. A Superhero Suit for Athletes. Businessweek 2006,10,13.



[17] Real-life Flubber, made in the UK, saving lives in war zones and on the football field. The Daily Telegraph. 2014-08-19.

[18] HARDING, T. Military to use new gel that stops bullets. The Daily Telegraph. (2009-02-27).

[19] PALMER, R. Energy absorbing material. US Patent 7,794,827,2008.

[20] Shock factor – d3o Latest Features. physics.org. 2009-05-27.

[21] PALMER R., Philip Green for Design Blue Ltd, Shock Absorbing Material US patent 7,381,460 B2.

[22] U.S. Patent 2,431,878 – Treating dimethyl silicon polymer with boric acid.

[23] U.S. Patent 2,541,851 – Process for making puttylike elastic plastic, siloxane derivative composition containing zinc hydroxide.

[24] ROBERTS, J. A Successful Failure”. Distillations Magazine. Chemical Heritage Foundation.2015,1 (2):8-9.

[25] The Synthesis of Bouncing Putty. Western Oregon University, <https://people.wou.edu/~courtna/ch462/BouncingPuttywith%20extras.htm>

*Publikacja opracowana na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2017-2019 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*