

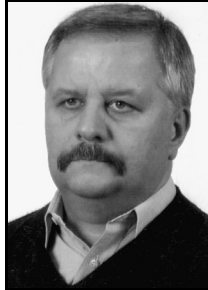
Krzysztof BASZCZYŃSKI

CENTRALNY INSTYTUT OCHRONY PRACY - PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY, ZAKŁAD OCHRON OSOBISTYCH
ul. Wierzbowa 48, 90-133 Łódź

Metoda i stanowisko do badania pochłaniania energii uderzenia poruszającego się obiektu przez przemysłowe helmy ochronne

Dr inż. Krzysztof BASZCZYŃSKI

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Łódzkiej (PŁ) kierunku elektronika w 1985 r. W 1994 r. uzyskał stopień doktora na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki PŁ. Od 1985 r. pracuje w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy - Państwowym Instytucie Badawczym. Zajmuje się badaniami wielkości mechanicznych metodami elektronicznymi, a w tym działaniem środków ochrony indywidualnej.



e-mail: krbas@ciop.lodz.pl

Streszczenie

Artykuł dotyczy problematyki badania parametrów ochronnych hełmów stosowanych w warunkach przemysłowych. Przedstawiono założenia do metody badania energii pochłanianej przez hełm ochronny podczas uderzenia poruszającego się obiektu. Zaprezentowano praktyczną realizację metody badań i zbudowane stanowisko. Scharakteryzowano jego konstrukcję i podstawowe parametry. Jego własności i zalety zostały ocenione na podstawie wyników badań wybranych typów hełmów ochronnych.

Słowa kluczowe: helmy ochronne, zdolność amortyzacji, pochłanianie energii.

A method and stand for testing absorption of moving object impact energy by industrial protective helmets

Abstract

The paper discusses the problems associated with testing protective parameters of helmets used in industrial environment. The disadvantages of the testing methods used to date, which do not allow predicting the helmet performance upon high-energy impact by a moving object, are presented. A new method of assessing impact energy absorbed by a helmet is proposed and assumptions for this method formulated. Practical implementation of the method as well as the developed test stand are presented. The stand allows measuring the force acting on a head form on impact inflicted by a falling object as well as the helmet deformation using a high speed digital camera. The software package designed to control the measuring instruments and to process the data recorded during the impact is described, with special emphasis on specialist software enabling description of the time course of helmet deformation using image identification methods. The presented method and stand were used for testing the selected types of protective industrial helmets. The obtained results indicate that the properties of such helmets fail to exceed significantly the minimal requirements specified in the relevant standards. The performed tests also demonstrate that the target parameters of the stand have been obtained and confirm that it is a unique tool enabling complex assessment of protective helmets, useful in particular for design and development of new construction solutions.

Keywords: industrial safety helmets, resistance to impact, energy absorption

1. Wprowadzenie

Z danych opublikowanych przez Departament Pracy Głównego Urzędu Statystycznego [1] wynika, że w 2010 r. w Polsce podczas pracy zostały poszkodowane 6602 osoby na skutek uderzenia przez spadające przedmioty. Wśród tych poszkodowanych 25 osób poniosło śmierć, a 37 doznało ciężkich obrażeń ciała. W 2011 r. [2] liczba wypadków spowodowanych przez spadające przedmioty kształtowała się na podobnym poziomie i wyniosła 6618, z tego przykładowo w budownictwie 950 i górnictwie 499. Z przytoczonych danych jednoznacznie wynika konieczność ochrony pracowników przed tego typu zagrożeniem. Jedną

z podstawowych, wygodnych i pociągających za sobą stosunkowo małe koszty metod zabezpieczania jest stosowanie hełmów ochronnych. Warunkiem skuteczności tej metody jest zapewnienie odpowiednich parametrów ochronnych hełmów stosowanych w warunkach przemysłowych.

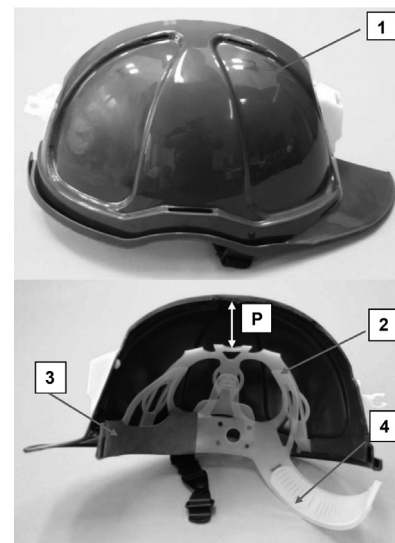
W chwili obecnej, aby przemysłowy hełm ochronny mógł znaleźć się na rynku Unii Europejskiej musi spełnić wymagania Dyrektywy 89/686/EWG [3], co w praktyce oznacza zgodność z wymaganiami normy zharmonizowanej EN 397:2012 [4]. W myśl tych wymagań jednym z podstawowych parametrów ochronnych hełmów jest zdolność amortyzacji. Wielkość ta jest określona jako maksymalna wartość siły przekazywanej przez hełm na makietę głowy podczas centralnego uderzenia w jego skorupę bijaka o masie $m = 5$ kg i energii kinetycznej $E = 49$ J. Zgodnie z wymaganiami normy [4], przyjętymi na podstawie badań medycznych odporności czaszki, kręgow szyi oraz mózgu człowieka na uszkodzenia mechaniczne [5], maksymalna wartość siły F nie może przekroczyć 5 kN.

Analizując tę metodę badania budzi się jednak wątpliwość jaką zdolność amortyzacji wykaże hełm, gdy energia uderzenia wzrośnie ponad wartość 49 J. Można przewidywać wystąpienie dwóch przypadków: w miarę stopniowego zwiększania energii uderzającego obiektu maksymalna wartość siły przekazywanej na makietę głowy będzie również zwiększała się stopniowo lub przeciwnie wzrośnie skokowo np. o kilkanaście kN.

Z tego powodu zaproponowano nową metodę badań, której celem jest określenie wartości energii, którą może pochłonąć hełm na skutek uderzenia zanim wartość siły przekazanej przez niego na makietę głowy nie przekroczy wartości granicznej $F = 5$ kN.

2. Założenia teoretyczne do metody badań

Hełm przemysłowy, którego przekrój przedstawiono na rys. 1, chroniąc przed uderzeniem poruszającego się obiektu absorbuje jego energię kinetyczną i ogranicza wartość siły dynamicznej działającej na głowę użytkownika.



Rys. 1. Przekrój przemysłowego hełmu ochronnego: 1 - skorupa hełmu, 2 - więźba, 3 - potnik, 4 - pas główny, P - odległość między wewnętrzną powierzchnią skorupy a więźbą

Fig. 1. Section of an industrial safety helmet: 1 - shell, 2 - cradle, 3 - sweatband, 4 - headband, P - distance between the internal surface of a shell and harness

Energia kinetyczna jest zamieniana w helmie głównie na deformację skorupy (1) i więzby (2). Deformacja ta nie powinna jednak zbliżyć się wartości P , ponieważ w przeciwnym przypadku dochodzi do kontaktu wewnętrznej powierzchni skorupy z głową użytkownika, co może prowadzić do poważnych obrażeń. Energię zaabsorbowaną przez helm podczas uderzenia można obliczyć według zależności:

$$E = \int_0^{y_m} F(y)dy \quad (1)$$

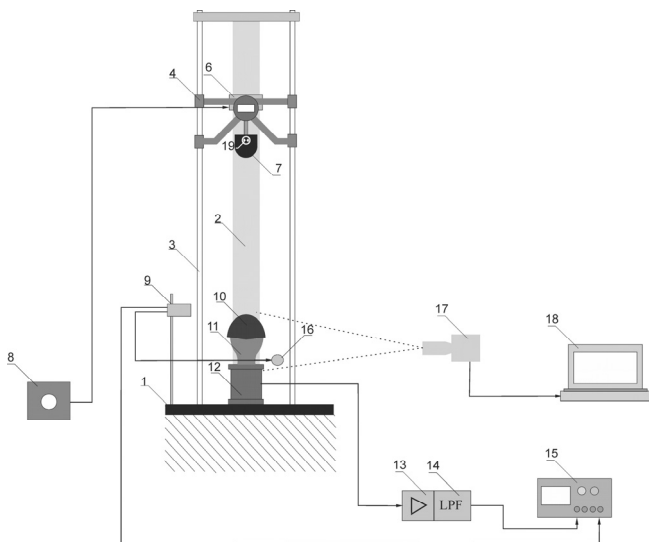
gdzie: y - deformacja helmu, y_m - maksymalna wartość deformacji podczas uderzenia, $F(y)$ - charakterystyka siła obciążająca - deformacja helmu.

Aby wykorzystać zależność (1) należy dysponować charakterystyką $F(y)$ uzyskaną podczas badań laboratoryjnych. Dla potrzeb opracowania odpowiedniej metody i stanowiska badawczego sformułowano następujące główne założenia:

- podczas badań helm umieszczony na nieruchomej makiecie głowy,
- w helm uderza poruszający się po prowadnicach bijak,
- podczas uderzenia mierzone są przebiegi czasowe: siły działającej na makietę głowy $F(t)$ oraz deformacji helmu $y(t)$, na podstawie których metodami numerycznymi jest wyznaczana charakterystyka $F(y)$,
- na podstawie charakterystyki $F(y)$ metodami numerycznymi obliczana jest wartość pochłoniętej energii w chwili, gdy siła F przekracza wartość graniczną 5 kN.

3. Stanowisko badawcze

Wykorzystując sformułowane wyżej założenia zbudowano stanowisko badawcze, którego schemat przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Stanowisko do badania energii absorbowanej przez helm ochronny podczas uderzenia. Oznaczenia: 1 - monolityczny fundament stanowiska, 2 - konstrukcja wsporcza, 3 - pionowe prowadnice, 4 - wózek, 5 - znacznik na bijaku, 6 - zaczep elektromagnetyczny, 7 - bijak, 8 - przycisk zwolnienia bijaka, 9 - układ pomiaru prędkości bijaka i synchronizacji, 10 - badany helm, 11 - makietka głowy, 12 - przetwornik pomiarowy siły, 13 - wzmacniacz, 14 - filtr analogowy, 15 - oscyloskop cyfrowy, 16 - dioda laserowa, 17 - cyfrowa kamera do szybkich zdjęć, 18 - komputer

Fig. 2. The stand for energy absorption tests of industrial safety helmets: 1 - monolithic base, 2 - supporting structure, 3 - vertical slideways, 4 - trolley, 5 - marker on a striker, 6 - electromagnetic latch, 7 - striker, 8 - button for releasing of a striker, 9 - device for measurements of striker speed, 10 - tested helmet, 11 - headform, 12 - force transducer, 13 - amplifier, 14 - analog filter, 15 - digital oscilloscope, 16 - laser diode, 17 - high speed digital camera, 18 - compute

Część mechaniczna stanowiska jest zainstalowana na monolitycznym fundamencie (1), którego masa przekracza 500 kg [6]. Jego zadaniem jest z jednej strony utrzymanie konstrukcji wsporczej stanowiska (2), a z drugiej przejście sił dynamicznych działających podczas uderzenia w badany helm. Elementami stanowiska są pionowe prowadnice (3) o długości około 3,5 m, po których porusza się wózek (4). Z wózkiem połączony jest bijak (7) o konstrukcji zdefiniowanej w normie [6], który w końcowej fazie swojego spadania uderza w badany helm (10). Wózek przed przeprowadzeniem badania jest blokowany przez zaczep elektromagnetyczny (6). Jego pionowa pozycja ustawiana jest ręcznie w związku z czym jest możliwe ustawienie zadanej wartości energii kinetycznej bijaka w chwili uderzenia w helm (10). Zaczep elektromagnetyczny jest zwalniany sygnałem inicjowanym przyciskiem (8). Badany helm jest mocowany na makiecie głowy spełniającej, pod względem konstrukcji, wymagania normy PN-EN 960:2007 [7].

Stanowisko wyposażono w elektroniczny system do pomiaru siły przekazywanej przez helm na makietę głowy (11) podczas uderzenia bijaka (7). Pierwszym elementem tego systemu jest przetwornik pomiarowy siły typ U3 HBM (12) zainstalowany na fundamencie stanowiska. Przy czym jego oś pokrywa się z osią spadającego bijaka (7). Przetwornik siły (12) został połączony ze wzmacniaczem (13) typ AE101 HBM i filtrem analogowym typ MS210R/ET6 (14), dzięki którym sygnał z przetwornika jest odpowiednio wzmacniany i filtrowany. Z punktu widzenia parametrów częstotliwościowych tor pomiarowy siły spełnia wymagania dla kanału CFC 600 zdefiniowanego w normie [8]. Ostatnim elementem toru pomiarowego siły jest oscyloskop cyfrowy Tektronix typ MSO 2024, którego zadaniem jest zapamiętanie przebiegu czasowego siły działającej na przetwornik (12), jego wizualizację i pomiar wybranych parametrów jak np. wartość maksymalna, czas narastania itp.

Drugim układem pomiarowym jest szybka kamera cyfrowa (17) typ MotionBlitz EoSens Cube7 firmy Mikrotron, zastosowana do rejestracji przemieszczenia znacznika (5) naniesionego na powierzchnię bijaka (7), podczas jego uderzenia w helm. Kamerę (17) połączono z komputerem (18), który służy do: programowania wymaganego trybu pracy, zapisywania zarejestrowanych obrazów oraz ich przetwarzanie. Kamerę ustawiono tak aby w polu jej widzenia znajdował się badany helm z bijakiem (7) w chwili ich zetknięcia oraz dioda laserowa (16) służąca do synchronizacji aparatury pomiarowej.

W stanowisku zastosowano układ synchronizacji pomiaru, który składa się z czujnika prędkości bijaka (9) i diody laserowej (16). Układ ten mierzy prędkość bijaka na ostatnich 20 mm drogi spadania przed uderzeniem w helm, a wynik jest wyświetlany na ekranie oscyloskopu (15). Układ synchronizacji generuje równocześnie dwa sygnały:

- wyzwalający rejestrację danych w oscyloskopie (15)
- włączający diodę laserową (16), której zapalenie się rejestruje kamera (17).

Dzięki takiemu działaniu jest osiągnięta synchronizacja danych zarejestrowanych przez oscyloskop (przebiegu czasowego siły) i kamerę (przemieszczenia bijaka). Ponadto wartość prędkości końcowej bijaka pozwala na precyzyjne określenie jego energii kinetycznej podczas uderzenia w badany helm.

4. Oprogramowanie

Wybudowane stanowisko badawcze wyposażono w specjalistyczne oprogramowanie, do którego głównych zadań należą:

- **Ustawienie trybu pracy cyfrowej kamery do wykonywania szybkich zdjęć**

Cyfrowa kamera do szybkich zdjęć MotionBlitz EoSens Cube7 przed zarejestrowaniem sekwencji obrazów wymaga ustawienia określonego trybu pracy. Zadanie to jest realizowane za pomocą współpracującego z kamerą komputera i jej oprogramowania sterującego. Na podstawie wyników wstępnych prób filmowania uderzającego w helm bijaka ustalono następujący tryb pracy

kamery: prędkość filmowania: 4000 klatek/s; wielkość rejestrowanego obrazu: obejmująca cały hełm z bijakiem; praca ciągła z ręcznym zatrzymywaniem rejestracji; sposób zapisu sekwencji filmowej: zbiór plików bmp. Dzięki takim ustawieniom kamera po komendzie START uruchamianej ręcznie na klawiaturze komputera (poprzedzającej zwolnienie bijaka) zaczyna rejestrować obrazy. Z chwilą zapelnienia całej pamięci rejestracja jest kontynuowana, a usuwane są z niej najwcześniej zapisane obrazy. Zakończenie rejestracji przez kamerę następuje po komendzie STOP uruchomionej ręcznie na klawiaturze komputera, po uderzeniu w hełm spadającego bijaka.

• Przetwarzanie zarejestrowanego obrazu z kamery

Sekwencja zdjęć zarejestrowana w pamięci komputera jest przetwarzana za pomocą specjalistycznego pakietu oprogramowania Tema Starter II firmy Motion System. Przetwarzanie to obejmuje:

- Identyfikację klatki, w której nastąpiło zapalenie się diody laserowej odpowiadające początkowi rejestracji przebiegu czasowego sił przez oscyloskop cyfrowy.
- Zdefiniowanie skali odległości na zarejestrowanych obrazach dla algorytmu automatycznego śledzenia ruchu znacznika. Dzięki temu program śledząc przemieszczenie znacznika na kolejnych klatkach podaje jego wartości w [mm].
- Analizę ruchu znacznika na kolejnych klatkach zarejestrowanego filmu za pomocą algorytmu identyfikacji. W efekcie działania tej procedury programu Tema Starter II otrzymuje się przebieg przemieszczenia znacznika, czyli deformacji hełmu, w funkcji czasu w postaci wykresu oraz tablicy.

• Tworzenie charakterystyki siła obciążająca – deformacja hełmu $F(y)$ oraz obliczanie pochłoniętej przez niego energii

Zadanie to jest realizowane przez program opracowany za pomocą pakietu Mathcad [9]. Danymi wejściowymi dla programu są zarejestrowane w pamięci oscyloskopu przebiegi siły działającej na hełm podczas uderzenia i otrzymywany za pomocą programu Tema Starter II przebieg przemieszczenia znacznika na bijaku odpowiadający deformacji hełmu.

5. Parametry stanowiska badawczego

Podsumowując informacje dotyczące wybudowanego stanowiska badawczego można wymienić jego najważniejsze parametry techniczne:

- masa bijaka uderzającego w hełm: 5 kg,
- maksymalna wartość energii kinetycznej bijaka: 200 J,
- konstrukcja makiet głowy: zgodna z normą EN 960: 2007 [7],
- pomiar prędkości końcowej opadania bijaka na odcinku o długości 20 mm przed uderzeniem w hełm,
- błąd względny pomiaru prędkości opadania bijaka: nie większy od $\pm 1\%$,
- zakres aparatury do pomiaru siły: (0,1 ÷ 20) kN,
- błąd względny części analogowej toru pomiarowego siły: nie większy od 1%,
- charakterystyka częstotliwościowa aparatury do pomiaru siły: zgodna z wymaganiami dla kanału CFC 600 [8],
- rozdzielczość pomiaru deformacji hełmu: nie mniejsza od 1 mm,
- prędkość rejestracji obrazów przez szybką kamerę cyfrową: 4000 klatek/s.

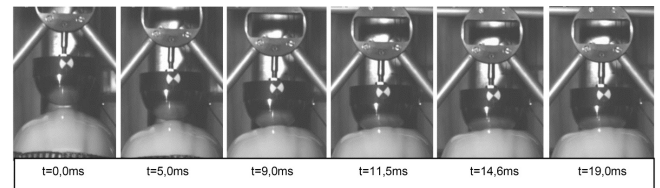
6. Przykładowe wyniki badań przemysłowych hełmów ochronnych

Przedstawione stanowisko można ocenić analizując wyniki przeprowadzonych za jego pomocą badań przemysłowych hełmów ochronnych. Obiektami badań były cztery typy hełmów scharakteryzowane w tabeli 1.

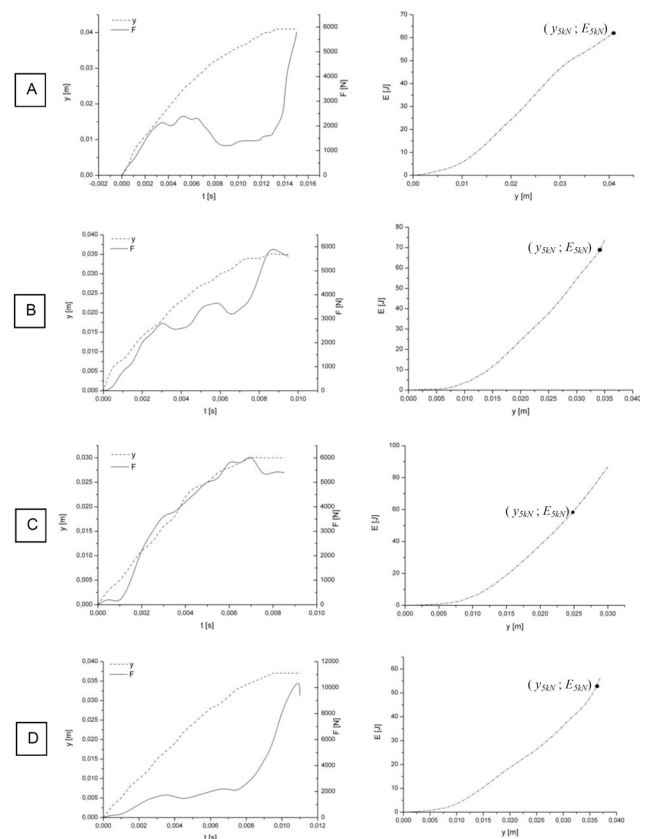
Tab. 1. Helmy poddane badaniom pochłaniania energii uderzenia
Tab. 1. Helmets used for energy absorption tests

Oznaczenie hełmu	Materiał skorupy	Materiał wężby
A	polietylen	taśmy włókiennicze
B	polietylen	taśmy włókiennicze
C	laminat poliestrowo - szklany	taśmy włókiennicze
D	ABS	polietylen

Zgodnie z przedstawioną metodyką badań hełmy założone na makietę głowy uderzano za pomocą spadającego bijaka. Wysokość swobodnego spadania bijaka h została dobrana dla każdego typu hełmu indywidualnie, tak aby maksymalna wartość siły przekazanej na makietę głowy była większa od 5 kN, a jednocześnie nie było ryzyka uszkodzenia stanowiska badawczego. W efekcie wartość h zawierała się w granicach od 1,5 do 2,0 m. Podczas uderzenia rejestrowano przebieg czasowy siły działającej na makietę głowy i przemieszczenie bijaka odpowiadające deformacji hełmu. Przykładowe zdjęcia zarejestrowane przez szybką kamerę cyfrową przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Wybrane fazy deformacji hełmu ochronnego podczas uderzenia bijaka
Fig. 3. Deformation of a helmet during impact of the striker



Rys. 4. Wyniki badania hełmów typ A, B, C, D
Fig. 4. Test results of the helmets of type A, B, C, D

Przebiegi te jako dane wejściowe przetwarzano za pomocą wcześniej przedstawionego oprogramowania. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2 i na rys. 4.

Tab. 2. Wyniki badań hełmów
Tab. 2. Tests results of safety helmets

Typ hełmu	y_{5kN} [mm]	E_{5kN} [J]
A	41	62,4
B	34	69,3
C	25	59,4
D	36	53,3

gdzie: y_{5kN} i E_{5kN} - deformacja hełmu i pochłonięta przez niego energia w chwili osiągnięcia przez siłę działającą na makietę głowy wartości $F = 5kN$,

Analizując wyniki przeprowadzonych badań hełmów można zauważyć, że:

- Uzyskane wielkości energii uderzenia E_{5kN} , którą mogą pochłoniąć przebadane hełmy przemysłowe, zawiera się w przybliżeniu w granicach (53 ÷ 70) J. Oznacza to, że ich właściwości ochronne nie wykraczają w istotny sposób ponad minimalne wymaganie normy EN 397:1997 [4].
- Największą energię uderzenia pochłonął hełm typ B mimo, że jego deformacja pod działaniem siły $F = 5 kN$ nie była największa. Oznacza to, że kształt jego charakterystyki $F(y)$ jest bardziej optymalny z punktu widzenia pochłaniania energii uderzenia niż w przypadku innych hełmów.
- Na przebiegach czasowych siły $F(t)$ z badań hełmów A, B, D można zauważyć wyraźny skokowy wzrost wartości. Występuje on w chwili zderzenia wewnętrznej powierzchni skorupy z makietą głowy przy maksymalnej deformacji.
- Na przebiegach czasowych siły $F(t)$ z badań hełmów C, D można zauważyć początkowy płaski fragment, gdzie siła nie przekracza 500N. Fragment ten odpowiada za wykasowywanie luzów więzby i jej zaczepów w gniazdach skorupy. Mimo relatywnie dużej deformacji w tym czasie zaabsorbowana energia jest mała.

7. Wnioski

Przedstawiona metoda i stanowisko do badania pochłaniania energii uderzenia poruszającego się obiektu przez przemysłowe

hełmy ochronne spełnia założony cel. Badania sprawdzające poszczególne podzespoły stanowiska potwierdziły uzyskanie założonych parametrów. Przeprowadzone badania wybranych typów przemysłowych hełmów ochronnych stosowanych w Polsce wykazały, że dzięki tej metodzie można uzyskać szereg cennych informacji, które nie są dostępne w dotychczas stosowanych standardowych metodach badań. Szczególnego znaczenia informacje te nabierają w przypadku opracowywania nowych konstrukcji hełmów ochronnych. W efekcie utworzono unikatowe w polskiej skali stanowisko, które może być wykorzystane przez krajowych producentów hełmów dla doskonalenia ich wyrobów.

Publikacja opracowana na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2011-2013 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej.

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

8. Literatura

- [1] Główny Urząd Statystyczny Departament Pracy: Wypadki przy pracy w 2010 r.
- [2] Główny Urząd Statystyczny Departament Pracy: Wypadki przy pracy w 2011 r.
- [3] Rozporządzenie MG z dnia 21 grudnia 2005 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla środków ochrony indywidualnej (wdrażające Dyrektywę 89/686/EWG).
- [4] PN-EN 397:2012 Przemysłowe hełmy ochronne.
- [5] Korycki R.: The damping of off-central impact for selected industrial safety helmets used in Poland. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE) 2002, vol. 8, no. 1, 51–70.
- [6] PN-EN 13087-2:2012 Hełmy ochronne. Metody badań. Część 2: Zdolność amortyzacji.
- [7] PN-EN 960:2007 Makiety głowy do badań hełmów ochronnych.
- [8] ISO 6487 Road vehicles - Measurement techniques in impact tests – Instrumentation.
- [9] Mathcad 2001 Professional, Warszawa 2003, ISBN 83-87674-56-7.

otrzymano / received: 11.11.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.01.2014

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Wersja elektroniczna miesięcznika PAK

Artykuły opublikowane w PAK po roku 1989 są dostępne w wersji elektronicznej m.in. w bazie artykułów PAK (www.pak.info.pl), w folderze „Archiwum numerów miesięcznika PAK”:

- pełne teksty artykułów z poprzednich lat i streszczenia artykułów najnowszych można pobrać bezpłatnie,
- pełne teksty artykułów z bieżącego roku można otrzymać za opłatą (5 PLN +1,15 PLN VAT).