

Ph.D. Eng. Tomasz Kamiński, prof. IBDiM^{1*)}

ORCID: 0000-0002-6695-4136

M.Sc. Dawid Kucharski¹⁾

M.Sc. Michał Karkowski¹⁾

Ph.D. Ewa Kamińska¹⁾

ORCID: 0000-0002-4547-8775

M.Sc. Robert Mitał²⁾

ORCID 0009-0000-8585-8310

M.Sc. Eng. Dawid Latała²⁾

ORCID: 0000-0001-8879-1326

Ph.D. Eng. Henryk Wachta³⁾

ORCID: 0000-0001-6198-4128

M.Sc. Eng. Mariusz Ejsmont⁴⁾

ORCID: 0009-0007-3761-4435

DOI: 10.15199/33.2024.07.09

Abstract. Despite the downward trend, in 2022 there were 296 accidents involving hitting a pole or sign, in which 46 people died and 329 were injured. The implementation of "vision zero", which assumes the elimination of accidents resulting in fatalities and serious injuries, requires improving the safety of road infrastructure. This article describes the results of the so-called Safe Lighting Points crash tests, enabling appropriate dissipation of collision energy.

Keywords: road safety; polygon crash tests; crash impact energy; lighting pole.

The negative impact of transport includes, inter alia, environmental impacts (emissions and noise) and road accidents resulting in injuries and fatalities. The effects of road accidents can be reduced by improving the passive and active safety of vehicles and the solutions and materials used in the construction of road infrastructure.

In the case of **passive vehicle safety** and reducing the impact of human error on traffic incidents (the most common cause of collisions and accidents), work is underway to automate driving, among other things. Electronic systems to prevent rear-end collisions, emergency braking, pedestrian recognition distraction detection and driver fatigue are being improved, as well as maintenance and automatic lane change, which are designed to assist the driver [1]. These systems can also be used for vehicles with a low degree of automation.

Active safety systems comprise vehicle equipment capable of mitigating the effects of a traffic incident [2]. These include airbag systems, seat belt pretensioners, controlled crumple zones, automatic emergency call (e-Call), etc. At the same time, components of the road infrastructure are being improved along with technological advances in vehicle construction. These include road safety devices (other than traffic signs) for organisational and visual traffic guidance,

¹⁾ Road and Bridge Research Institute

²⁾ Elektromontaż Rzeszów S.A.

³⁾ Rzeszów University of Technology

⁴⁾ LUG Light Factory Sp. z o.o.

^{*}) Correspondence address: tkaminski@ibdim.edu.pl

Safe Lighting Points polygon crash tests

Poligonowe testy zderzeniowe Bezpiecznych Punktów Oświetleniowych

Streszczenie. Mimo tendencji spadkowej, w 2022 r. w Polsce doszło do 296 wypadków polegających na uderzeniu w słup lub znak, w których 46 osób zginęło, a 329 zostało rannych. Realizacja „wizji zero”, zakładającej wyeliminowanie wypadków, których skutkiem są ofiary śmiertelne i ciężko ranne, wymaga poprawy bezpieczeństwa infrastruktury drogowej. W artykule opisano wyniki testów zderzeniowych tzw. Bezpiecznych Punktów Oświetleniowych, umożliwiających odpowiednie rozpraszanie energii zderzenia.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo ruchu drogowego; poligonowy test zderzeniowy; energia zderzenia drogowego; słup oświetleniowy.

Negatywny wpływ transportu obejmuje m.in. oddziaływanie na środowisko naturalne (emisja zanieczyszczeń i hałasu) i wypadki drogowe, których efektem są osoby ranne i ofiary śmiertelne. Skutki wypadków drogowych można ograniczać przez doskonalenie biernego i czynnego bezpieczeństwa pojazdów oraz rozwiązań i materiałów stosowanych do budowy infrastruktury drogowej.

W przypadku **biernego bezpieczeństwa pojazdów** i ograniczenia wpływu błędu ludzkiego na zdarzenia drogowe (najczęstsza przyczyna kolizji i wypadków) prowadzone są prace zmierzające m.in. do automatyzacji jazdy. Doskonalone są elektroniczne systemy zapobiegające najechaniu na poprzedzający pojazd, systemy awaryjnego hamowania, rozpoznawania pieszych, wykrywania rozproszenia i zmęczenia kierowcy oraz utrzymania i automatycznej zmiany pasa ruchu, których celem jest wspomaganie kierowcy [1]. Systemy te mogą być stosowane również w przypadku pojazdów o niskim stopniu automatyzacji.

Systemy bezpieczeństwa czynnego obejmują wyposażenie pojazdu umożliwiające ograniczanie skutków zdarzenia drogowego [2]. Należą do nich m.in. systemy poduszek powietrznych, napinacze pasów bezpieczeństwa, strefy kontrolowanego zgniotu, automatyczne powiadomianie ratunkowe (e-Call) itp. Jednocześnie, wraz z postępem technologicznym w budowie pojazdów, doskonalone są elementy infrastruktury drogowej. Należą do nich urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego (inne niż znaki drogowe), służące organizacyjnemu i optycznemu prowadzeniu ruchu, pikietażowi, bezpieczeństwu i oznakowaniu robót drogowych. Jednym z takich elementów są **słupy oświetleniowe**. W przypadku kolizji ze słu-

picketing, safety and marking of road works. **Lighting poles** are one such element. In the event of a collision with a pole, it should minimise the negative effects of the collision by limiting the energy received from the vehicle to a level that is safe for collision participants. At the same time, it is advantageous for the pole to pick up some of the impact energy and, as a result, reduce the speed of the vehicle or bring it to a complete halt [3].

The main value that determines the safety of the crash participants is the **value of acceleration** [4], with the direction of impact being important – frontal, lateral, rear – the rarest (a rotating vehicle strikes a pole with its back) or at an angle. The ultimate impact of a collision is determined by a number of factors, which may include the initial speed of the vehicle at the time of impact, the nature of the impact (frontal/lateral, etc.), the type and equipment of the vehicle, and the personal characteristics of the individual (including age and weight) [5, 6, 7]. However, the most vulnerable is the head of the crash participant, which has little resistance to high acceleration [8]. Therefore, **based on the results of the measurements taken during the crash test the THIV coefficient is calculated, among other things, which determines the theoretical speed of the head of the collision participant and PHD characterising the deceleration of the head after the vehicle collides with the safety barrier.**

This paper describes the results of exemplary polygon crash tests of Safe Lighting Points, consisting of a modified lighting pole and luminaire solution, with features to improve the passive safety of all road users, including pedestrians and cyclists. In addition to people being in the vehicle, exposed when a car collides with a pole, a group of the so-called vulnerable road users are also at risk. Their safety is jeopardised by elements of the luminaire (including shards of the glass lampshade), the power supply contained within the luminaire and sharp printed circuit elements of the electrical and electronic equipment and falling after a collision. Although the pole, together with the luminaire, serves to improve the safety of all road users, the research and design work to improve the safety of drivers and passengers presented in the paper has focused mainly on the problems of minimising the impact of a vehicle colliding with a pole over a wide range of speeds. The impact of the pole-luminaire system on other road users, including pedestrians, cyclists and scooter users, was not analysed. Nor was the subject of the integration of the luminaire with the pole addressed in terms of safety. The main premise of the author's experimental research presented here was to extend the concept of „lighting poles with passive safety features” to the entire lighting system, including the luminaire, and to include the protection of all road users. On this basis, the new concept of „Safe Lighting Point” was defined.

In order to verify that the developed solution is safe and can be installed as part of the road infrastructure, polygon tests are being carried out under standardised, safe conditions.

The modified pole and luminaire solution presented in the paper was subjected to a total of nineteen tests, and a

pem powinien on minimalizować negatywne efekty zderzenia, ograniczając energię odbieraną od pojazdu do poziomu bezpiecznego dla uczestników kolizji. Jednocześnie korzystne jest, aby słup odbierał część energii zderzenia i w efekcie zmniejszał prędkość pojazdu lub go całkowicie zatrzymywał [3].

Główną wielkością decydującą o bezpieczeństwie uczestników zderzenia jest **wartość przyspieszenia** [4], przy czym istotne znaczenie ma kierunek zderzenia – czołowy, boczny, najrzadziej występujący – tylny (obracający się pojazd uderza tyłem w słup) lub pod kątem. O ostatecznych skutkach kolizji decyduje wiele czynników, do których można zaliczyć prędkość początkową pojazdu w czasie uderzenia, charakter uderzenia (czołowe/boczne itp.), rodzaj i wyposażenie pojazdu, cechy osobowe człowieka (m.in. wiek i masa ciała) [5, 6, 7]. Najbardziej jednak narażona jest głowa uczestnika zderzenia, która jest mało odporna na wysokie przyspieszenie [8]. W związku z tym **na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych podczas testu zderzeniowego obliczany jest m.in. współczynnik THIV, określający teoretyczną prędkość głowy uczestnika kolizji oraz PHD charakteryzujący opóźnienie głowy po zderzeniu pojazdu z barierą ochronną.**

W artykule opisano wyniki przykładowych poligonowych testów zderzeniowych Bezpiecznych Punktów Oświetleniowych, składających się ze zmodyfikowanego rozwiązania w postaci słupa oświetleniowego i oprawy oświetleniowej, z cechami zapewniającymi poprawę bezpieczeństwa biernego wszystkich uczestników ruchu drogowego, w tym pieszych i rowerzystów. Oprócz osób znajdujących się w pojeździe, narażonych w czasie zderzenia samochodu ze słupem, zagrożona jest także grupa tzw. niechronionych uczestników ruchu drogowego. Ich bezpieczeństwu zagrażają elementy oprawy oświetleniowej (w tym odłamki szklanego klosza), zasilacza znajdującego się w oprawie i ostrych elementów obwodów drukowanych wyposażenia elektrycznego i elektronicznego oraz spadających po zderzeniu. Mimo że słup wraz z oprawą służy poprawie bezpieczeństwa wszystkich uczestników ruchu drogowego, to badania i prace konstrukcyjne, mające na celu poprawę bezpieczeństwa kierowców i pasażerów przedstawione w artykule, skoncentrowane były głównie na problemach minimalizacji skutków zderzenia pojazdu ze słupem w przypadku szerokiego zakresu prędkości. Nie analizowano oddziaływania układu słup–oprawa oświetleniowa na pozostałych uczestników ruchu drogowego, w tym pieszych, rowerzystów oraz użytkowników hulajnóg. Nie podejmowano też tematu integracji oprawy ze słupem w kontekście bezpieczeństwa. Głównym założeniem przedstawionych autorskich badań eksperymentalnych było rozszerzenie pojęcia „słupów oświetleniowych z cechami bezpieczeństwa biernego” na cały system oświetleniowy, włączając w to także oprawę oświetleniową oraz objęcie ochroną wszystkich uczestników ruchu drogowego. Na tej podstawie zdefiniowano nowe pojęcie „Bezpiecznego Punktu Oświetleniowego”.

W celu weryfikacji, czy opracowane rozwiązanie jest bezpieczne i może być instalowane jako element infrastruktury drogowej, prowadzone są testy poligonowe realizowane w znormalizowanych, bezpiecznych warunkach.

Przedstawione w artykule rozwiązanie w postaci zmodyfikowanego słupa i oprawy oświetleniowej zostało poddane łącz-

comparison of three of them is presented in the paper. The tests were carried out in accordance with EN 1317 [9]. An Opel Corsa B car was used, and the acceleration along its longitudinal axis along which the collision with the pillar under investigation occurred, was recorded. Based on the acceleration, the vehicle's speed and kinetic energy were calculated. An analysis of the course and values allowed for the conclusions to be drawn.

Road traffic safety status

It should be noted that both the number of vehicles and the volume of traffic are increasing. This is due to the need for mobility caused, among other things, by the increasing energy intensity of the economy and changing habits of citizens who are increasingly willing to travel [10]. A negative consequence of the increase in mobility, and consequently the number of vehicles and the volume of traffic, is an increase in traffic incidents. When analysing the annual reports of the Police Headquarters, particular attention was paid to accidents with fixed obstacles such as road infrastructure elements, as shown in Figure 1 [11 ÷ 20]. In 2022, there were 296 accidents involving a crash into a pole or sign, in which 46 people were killed and 329 injured. In addition to the dimension associated with the suffering and even death of road traffic participants, accidents generate high costs. According to the triennial figures presented by the National Road Safety Council, the cost of all road incidents in Poland in 2021 was PLN 39.3 billion.

In order to improve road safety, the National Road Traffic Safety Programme 2021 – 2030 has been developed [21]. Its main objective, with a view to 2030, is to reduce the number of most seriously injured casualties, including fatalities to 1,455 and severely injured people to 5,317 (compared to 2,474 and 9,040 people respectively in 2023). In the National Road Traffic Safety Programme, reference will be made to the so-called Vision Zero, which aims to achieve the goal of reducing fatalities and serious injuries to zero. It was noted in Programme that a road user is obliged to use the road infrastructure in a way that complies with current legislation and that, at the same time, mistakes are made. Despite the mistakes, which may prove difficult or impossible to address, the infrastructure should reduce the impact of traffic incidents without causing additional risk.

The National Road Traffic Safety Programme defines an intervention structure that includes five pillars covering the main areas related to improving road safety. One of the pillars is “safe roads”, of which lighting poles are an infrastructural component. In addition to their primary function of providing illumination of a stretch of road, the poles can absorb the

nie dziewiętnastu testom, a porównanie trzech z nich zaprezentowano w artykule. Testy były przeprowadzone zgodnie z normą PN-EN 1317 [9]. Wykorzystano w nich samochód Opel Corsa B, rejestrując przyspieszenie działające wzdłuż jego osi podłużnej, wzdłuż której nastąpiło zderzenie z badanym słupem. Na podstawie przyspieszenia obliczono prędkość pojazdu i jego energię kinetyczną. Analiza przebiegu i wartości tych wielkości pozwoliła na sformułowanie wniosków.

Stan bezpieczeństwa ruchu drogowego

Należy podkreślić, że zwiększa się zarówno liczba pojazdów, jak również natężenie ruchu drogowego. Jest to spowodowane potrzebą zapewnienia mobilności wywołanej m.in. wzrostem energochłonności gospodarki i zmianą przyzwyczajęń obywateli, którzy coraz chętniej podróżują [10]. Negatywnym skutkiem wzrostu mobilności, a co jest z tym związane, liczby pojazdów i natężenia ruchu drogowego, jest wzrost liczby zdarzeń drogowych. Dokonując analizy rocznych raportów Komendy Głównej Policji, szczególną uwagę zwrócono na wypadki z przeszkodami stałymi, jakimi są elementy infrastruktury drogowej, co przedstawia rysunek 1 [11 ÷ 20]. W 2022 r. doszło do 296 wypadków polegających na uderzeniu w słup lub znak, w których 46 osób zginęło, a 329 zostało rannych. Wypadki, oprócz wymiaru związanego z cierpieniem, a nawet śmiercią uczestników zdarzeń drogowych, generują wysokie koszty. Zgodnie z przedstawianymi co trzy lata danymi Krajowej Rady Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego, koszty wszystkich zdarzeń drogowych w Polsce w 2021 r. wyniosły 39,3 mld zł.

W celu poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego opracowany został Narodowy Program BRD na lata 2021 – 2030 [21]. Głównym jego celem, w perspektywie do 2030 r., jest redukcja ofiar najciężej poszkodowanych, w tym liczby ofiar śmiertelnych do 1455, a osób ciężko rannych do 5317 (wobec odpowiednio 2474 i 9040 osób w 2023 r.). W Narodowym Programie BRD znajdziemy odniesienie do tzw. Wizji Zero, która zakłada osiągnięcie celu redukcji ofiar śmiertelnych i ciężko rannych do zera. W Programie zauważono, że uczestnik ruchu drogowego jest zobowiązany do korzystania z infrastruktury drogowej w sposób zgodny z obowiązującymi przepisami prawa oraz że jednocześnie popełnia on błędy. Mimo tych błędów, których wyeliminowanie może się okazać trudne lub niemożliwe w realizacji, infrastruktura powinna ograniczać skutki zdarzeń drogowych, nie powodując jednocześnie dodatkowego zagrożenia.

W Narodowym Programie BRD zdefiniowana została struktura interwencji, w której uwzględniono pięć filarów obejmujących główne obszary związane z poprawą bezpieczeństwa ruchu drogowego. Jednym z filarów są „bezpieczne drogi”, których elementem infrastrukturalnym są słupy oświetleniowe. Oprócz podstawowej funkcji, jaką jest zapewnienie oświetlenia

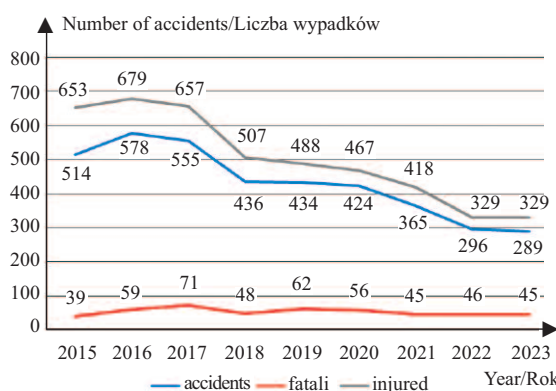


Fig. 1. Accidents with running into a pole/sign in 2015 – 2023 in Poland [11 ÷ 20]

Rys. 1. Wypadki z najechaniem na słup/znak w latach 2015 – 2023 w Polsce [11 ÷ 20]

kinetic energy of the vehicle during a collision in such a way as to decelerate it while not causing an excessive increase in the acceleration acting on people in the vehicle.

Passive safety of roadside support structures

Road infrastructure components must not endanger road crash participants [22]. For this reason, the EN 12767:2019 standard on the passive safety of support structures for road equipment has been introduced [23]. Infrastructure components must be tested under polygon conditions before application. The standard classifies three ranges for the level of energy absorption of support structures:

- **NE (Non Energy) class** – non-energy absorbing structures;
- **LE (Low Energy) class** – low energy absorbing structures;
- **HE (High Energy) class** – high energy absorbing structures;
- **class 0 structures** – no passive safety features.

The determination of passive structural safety refers to three defined speed values at the time of a crash, i.e. 50, 70 and 100 km/h. In addition, the standard defines the safety classification of motor vehicle passengers and drivers from the highest class A to class E, and also defines the mechanism of loss of stability (with separation of the pole from the base – SE and without separation – NS), three classes of direction – unidirectional SD, bi-directional BD and multidirectional MD (susceptibility to angle of impact) and two classes of vehicle roof dent risk (0 or 1). Table 1 shows the energy absorption categories as a function of vehicle speed [23].

Table 1. Categories of energy absorption for individual impact speeds [23]

Tabela. 1. Kategorie pochłaniania energii w przypadku poszczególnych prędkości zderzenia [23]

Energy absorption category/Kategoria pochłaniania energii	Initial speed v_e [km/h]/Prędkość początkowa v_e [km/h]		
	50	70	100
Class „0”	–	–	–
NE	$5 < v_e \leq 50$	$30 < v_e \leq 70$	$70 < v_e \leq 100$
LE	$0 < v_e \leq 5$	$5 < v_e \leq 30$	$50 < v_e \leq 70$
HE	0	$0 < v_e \leq 5$	$0 < v_e \leq 50$

Testing of roadside support structures used in the road construction industry

Crash tests are carried out in accordance with the harmonised European standard EN 1317. Road safety devices that have received positive results from field crash tests and have passed the certification process required by the Building Law are permitted for use on roads. From the point of view of protecting human health and life, it is not only important for safety equipment to meet technical requirements, but also to reduce the impact of high acceleration, which is a cause of injury. The standard does not define the method of manufacture and the material from which the road infrastructure component should be made. Instead, it defines the values verified during the field crash test, such as the **containment level; the degree of deformation and the value of acceleration** experienced by the crash participant's head in the vehicle. Accordingly, the EN 1317 standard classifies safety devices on the basis of:

odcinka drogi, słupy podczas zderzenia mogą pochłaniać energię kinetyczną pojazdu w taki sposób, aby go wyhamowywać, a jednocześnie nie powodować nadmiernego wzrostu przyspieszenia działającego na osoby znajdujące się w pojeździe.

Bierne bezpieczeństwo drogowych konstrukcji wsporczych

Elementy infrastruktury drogowej nie mogą zagrażać uczestnikom zderzenia drogowego [22]. Z tego względu wprowadzona została PN-EN 12767:2019 dotycząca biernego bezpieczeństwa konstrukcji wsporczych do urządzeń drogowych [23]. Elementy infrastruktury przed zastosowaniem muszą być zbadane w warunkach poligonowych. Norma klasyfikuje trzy przedziały poziomu pochłaniania energii przez konstrukcje wsporcze:

- **klasa NE (Non Energy)** – konstrukcje niepochłaniające energii uderzenia;
- **klasa LE (Low Energy)** – konstrukcje pochłaniające energię w stopniu niskim;
- **klasa HE (High Energy)** – konstrukcje pochłaniające energię w stopniu wysokim;
- **konstrukcje klasy 0** – brak cech bezpieczeństwa biernego.

Określenie biernego bezpieczeństwa konstrukcji odnosi się

do trzech zdefiniowanych wartości prędkości w chwili zderzenia, tj. 50, 70 i 100 km/h. Dodatkowo norma określa klasyfikację bezpieczeństwa pasażerów i kierowców pojazdów mechanicznych od najwyższej klasy A do klasy E, a także definiuje mechanizm utraty stateczności (z oddzieleniem się słupa od podstawy – SE i bez oddzielenia – NS), trzy klasy kierunku – jedno- SD, dwu- BD i wielokierunkowy MD (podatność na kąt uderzenia) oraz dwie klasy ryzyka wgniecenia dachu pojazdu (0 lub 1). W tabeli 1 pokazano kategorie pochłaniania energii w zależności od prędkości pojazdu [23].

Badania drogowych konstrukcji wsporczych stosowanych w drogownictwie

Testy zderzeniowe są realizowane zgodnie ze zharmonizowaną normą europejską PN-EN 1317. Do stosowania na drogach dopuszcza się urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego, które uzyskały pozytywne wyniki poligonowych prób zderzeniowych i przeszły pomyślnie proces certyfikacji, wymagany przepisami Prawa budowlanego. Z punktu widzenia ochrony zdrowia i życia ludzkiego, istotne jest nie tylko spełnienie wymagań technicznych przez urządzenia bezpieczeństwa, ale również ograniczenie oddziaływania dużego przyspieszenia, które jest przyczyną urazów. Norma nie definiuje sposobu produkcji i materiału, z którego powinien być wykonany element infrastruktury drogowej. Określa natomiast wartości weryfikowane podczas poligonowego testu zderzeniowego, takie jak: **poziom powstrzymywanie; stopień odkształcenia i wartość przyspieszenia**, jakiego doznaje głowa uczestnika zderzenia w pojeździe. W związku z tym PN-EN 1317 klasyfikuje urządzenia bezpieczeństwa na podstawie:

1) the containment level:

- low – T1, T2, T3 (for temporary safety barriers only);
- normal – N1, N2;
- increased – H1, H2, H3;
- very high – H4a, H4b;

2) deformation expressed in working width (in the case of road barriers);

3) level of impact intensity.

The containment level is defined as the ability of an infrastructure component to contain an impacting vehicle.

It is tested using passenger and heavy goods vehicles, of varying weights, accelerated to predefined speeds. The deformation-related “working width” is defined as the distance between the lateral face of the barrier on the movement side before impact and the maximum dynamic lateral position of any major part of the system. The working width is a measure of the deformation of the barrier, the classification of which was carried out in accordance with EN 1317 (Table 2).

The last of the previously mentioned parameters specified in the standard is the **level of impact intensity**. It is related to

the degree of impact of the crash on people in the vehicle and takes three levels – A, B and C, assessed using the ASI, THIV and PHD indicators (Table 3).

ASI is a dimensionless acceleration intensity index calculated in

accordance with EN 1317. The maximum value of this factor is considered to be a measure of the severity of a collision involving people inside the vehicle. ASI is therefore considered to be one of the most important parameters for characterising road infrastructure components during a crash. The **THIV** value determines the theoretical velocity of the crash participant's head during impact with the surface inside the vehicle, due to the vehicle colliding with the guardrail, while the **PHD** value characterises the deceleration of the head after the vehicle has collided with the guardrail. This parameter expresses the value of the deceleration experienced by the head of the collision participant when the vehicle hits the guardrail. The maximum deceleration value must not exceed 20 g.

Polygon crash test

The crash test of a passenger car with a lighting pole was carried out on the test track of the Road and Bridge Research Institute in Inowrocław, equipped with:

- 350 m long overrun track,
- a system for remote acceleration of experimental vehicles;

1) poziomu powstrzymania:

■ mały – T1, T2, T3 (przeznaczony tylko do tymczasowych barier ochronnych);

■ normalny – N1, N2;

■ podwyższony – H1, H2, H3;

■ bardzo wysoki – H4a, H4b;

2) odkształcenia wyrażonego szerokością pracującą (w przypadku barier drogowych);

3) poziomu intensywności zderzenia.

Poziom powstrzymania zdefiniowany jest jako zdolność elementu infrastruktury do powstrzymania uderzającego

w nią pojazdu. Jest on badany z użyciem pojazdów osobowych i ciężarowych, o różnej masie, rozpędzonych do zadanych prędkości. Związana z odkształceniem „szerokość pracująca” jest zdefiniowana jako odległość między boczną powierzchnią czołową bariery od strony ruchu przed zderzeniem a maksymalnym dynamicznym bocznym położeniem jakiegokolwiek większej części systemu. Szerokość pracująca jest miarą odkształcenia bariery, której klasyfikacja została przeprowadzona zgodnie z PN-EN 1317 (tabela 2).

Ostatnim z wymienionych wcześniej, określonych w normie parametrów, jest **poziom intensywności zderzenia**. Jest on zwią-

zany ze stopniem oddziaływania zderzenia na osoby znajdujące się w pojeździe i przyjmuje trzy poziomy – A, B i C, oceniane przy użyciu wskaźników ASI, THIV i PHD (tabela 3).

ASI jest bezwymiarowym wskaźnikiem intensywności przyspieszenia,

obliczanym zgodnie z normą PN-EN 1317. Maksymalna wartość tego współczynnika jest uważana za miarę ciężkości kolizji, w której uczestniczą osoby znajdujące się wewnątrz pojazdu. W związku z tym ASI jest uważany za jeden z najważniejszych parametrów charakteryzujących elementy infrastruktury drogowej podczas zderzenia. Wartość **THIV** określa teoretyczną prędkość głowy uczestnika kolizji w czasie uderzenia w powierzchnię wewnątrz pojazdu, na skutek zderzenia pojazdu z barierą ochronną, natomiast wartość **PHD** charakteryzuje opóźnienie głowy po zderzeniu pojazdu z barierą ochronną. Parametr ten wyraża wartość opóźnienia, jakiego doznaje głowa uczestnika kolizji w chwili uderzenia pojazdu w barierę ochronną. Maksymalna wartość opóźnienia nie może przekroczyć 20 g.

Poligonowy test zderzeniowy

Test zderzeniowy samochodu osobowego ze słupem oświetleniowym przeprowadzono na torze badawczym Instytutu Badawczego Dróg i Mostów w Inowrocławiu, wyposażonym w:

- tor najazdowy o długości 350 m,
- układ zdalnego rozpędzania pojazdów doświadczalnych;

Table 2. Classes of working width levels defined in PN-EN 1317

Tabela 2. Klasy poziomów szerokości pracującej, określone w PN-EN 1317

Working width level class/Klasa poziomu szerokości pracującej	Working width level [m] /Poziom szerokości pracującej [m]
W1	$W \leq 0,6$ m
W2	$W \leq 0,8$ m
W3	$W \leq 1,0$ m
W4	$W \leq 1,3$ m
W5	$W \leq 1,7$ m
W5	$W \leq 2,1$ m
W7	$W \leq 2,5$ m
W8	$W \leq 3,5$ m

Table 3. Crash intensity levels defined in PN-EN 1317

Tabela 3. Poziomy intensywności zderzenia określone w normie PN-EN 1317

Level of impact intensity/ Poziom intensywności zderzenia	ASI acceleration intensity index [-]/ Wskaźnik intensywności przyspieszenia ASI [-]	Theoretical head velocity during THIV impact [km/h] /Teoretyczna prędkość głowy w czasie zderzenia THIV[km/h]	Head deceleration after PHD impact [g]/ Opóźnienie głowy po zderzeniu PHD [g]
A	$\leq 1,0$	≤ 33	≤ 20
B	$1,0 < ASI \leq 1,4$	≤ 33	≤ 20
C	$1,4 < ASI \leq 1,9$	≤ 33	≤ 20

- measurement and testing infrastructure (internal fibre-optic network, power supply backup system, synchronization system for remote start-up of measurement equipment);

- a station for recording the rapidly changing physical phenomena occurring during the collision of the vehicle with the objects under study;

- a system for recording the overload (acceleration/deceleration) acting on the driver during a crash, using an ATD (*Antropomorphic Test Device*) in the form of a Hybrid – III dummy and involving full-size vehicles (Photo 1).

Passenger motor vehicles were used in the study. Their weight is limited by the recommendations of standard EN 12767 and should be 900 ± 40 kg. The test presented in the paper uses an Opel Corsa B passenger car, produced in Europe between 1993 and 2000, with a mass of 940 kg. The vehicles were accelerated as required, using a remote

acceleration system, over a distance of 350 m. Figure 1 shows a sketch of the phase preceding the direct impact of the vehicle on the pole shaft. It shows a test vehicle (1), lighting pole (6) together with the value of the regulatory required angle of impact (2) and direction of movement (5). Impact speed measurement zones of 6 m (3) and an impact terminal speed measurement zone of 12 m (4) are also delineated. In addition, the crash zone was equipped with a camera system for video recording and specialised cameras for large-frame recording. Photo 2 shows an example of the cars used in the test.

The subject of the study was steel street lighting poles with passive safety features according to EN 12767 and dedicated road lighting luminaires. The structure of the passive pole is a suitably shaped cone made of steel sheet or aluminium tube. The cone at the wider end is welded to a specially adapted flat footing with three basic fixing nodes. The „safety” pole footing, combined with a suitable foundation with three fixing anchors and three fixing hooks, provides an effective fixing mechanism for the pole to carry the static loads of the pole and vibration. In the event of an impact on the pole, under the conditions specified in EN 12767 for class NE, the mechanism ensures

- infrastrukturę pomiarowo-badawczą (wewnętrzna sieć światłowodowa, system podtrzymywania energii zasilającej, system synchronizacji zdalnego uruchamiania aparatury pomiarowej);

- stanowisko do rejestracji szybkozmiennych zjawisk fizycznych występujących podczas zderzenia pojazdu z badanymi obiektami;

- system rejestracji przeciążeń (przyspieszenia/opóźnienia) działających na kierowcę w czasie zderzenia, z wykorzystaniem urządzenia ATD (*Antropomorphic Test Device*) w postaci manekina Hybrid – III oraz z udziałem pełnowymiarowych pojazdów (fotografia 1).

W badaniach wykorzystano osobowe pojazdy samochodowe. Ich masa jest limitowana zaleceniami normy EN 12767 i powinna wynosić 900 ± 40 kg. W prezentowanym w artykule teście zastosowano samochód osobowy Opel Corsa B, produkowany w Europie w latach 1993 – 2000, o masie 940 kg. Pojazdy były rozpędzane odpowiednio do potrzeb, za pomocą zdalnego układu rozpędzającego, na odcinku 350 m. Na fotografii 1 pokazano szkic fazy poprzedzającej bezpośrednie uderzenie pojazdu w trzon słupa. Widać na niej pojazd badawczy (1), słup oświetleniowy (6) wraz z wartością wymaganego przepisami kąta uderzenia (2) i kierunku ruchu (5). Wyznaczone są również strefy pomiaru prędkości uderzenia o długości 6 m (3) oraz strefa pomiaru prędkości końcowej uderzenia o długości 12 m (4). Dodatkowo strefa zderzenia została wyposażona w system kamer do rejestracji obrazu oraz kamer specjalistycznych do rejestracji wielkoklatkowej. Na fotografii 2 pokazano przykładowe samochody użyte w teście.

Przedmiotem badań były stalowe słupy uliczne z cechami bezpieczeństwa biernego wg PN/EN 12767 oraz dedykowane oprawy oświetlenia drogowego. Konstrukcję słupa pasywnego stanowi odpowiednio uformowany stożek, wykonany z blachy stalowej lub rury aluminiowej. Stożek w szerszym końcu jest przyspawany do specjalnie przystosowanej płaskiej stopy z trzema podstawowymi węzłami mocującymi. Stopa słupa „bezpiecznego”, w połączeniu z odpowiednim fundamentem z trzema kotwami mocującymi oraz trzema zaczepami mocującymi, stanowi skuteczny mechanizm mocowania słupa umożliwiający przenoszenie

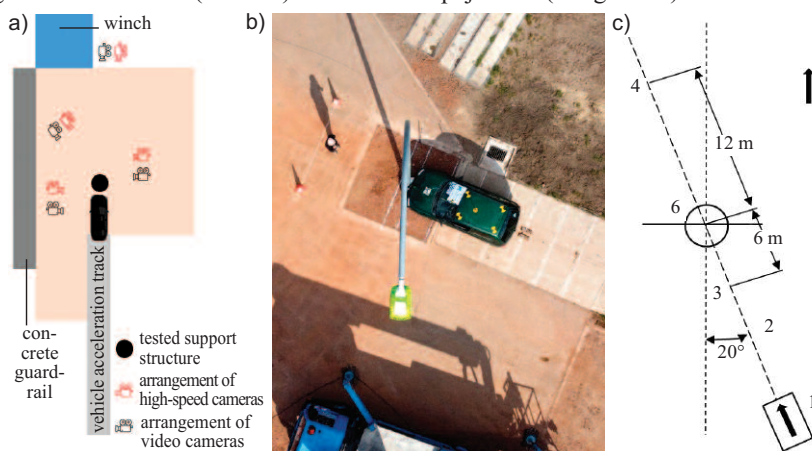


Photo 1. Arrangement scheme of the key elements of the crash test stand (a); view of a section of the track (b) and diagram of the implementation of the crash test (c)
 Fot. 1. Schemat rozmieszczenia kluczowych elementów testowego stanowiska zderzeniowego (a); widok fragmentu toru (b) i schemat realizacji testu zderzeniowego (c)



Photo 2. The interior of the car before test (a) and the wrecked car after the test (b)
 Fot. 2. Wnętrze samochodu przed testem (a) i rozbitego samochodu po teście (b)

that the column is disengaged from the fixing hooks, thus meeting class NE of the pole-foundation set. In the case of safety classes HE and LE, an additional cable-spring mechanism is used, connecting the footing of the pole to the foundation, which dampens the impact energy of the vehicle in the event of an impact on the pole, under the conditions specified in EN 12767. In these solutions, the relevant class of absorption of the energy of the collision with the pole (NE, HE or LE) is carried out by a foundation with an appropriate mechanism.

The design of the lighting set includes five innovative solutions filed with the Polish Patent Office. These include patent applications entitled “Structural connection of a pole shaft, in particular a lighting pole with its foundation, absorbing impacts of a motor vehicle” under patent number P.435592; “Lighting luminaire” under patent number P.440349; “Lighting luminaire cover” under patent number P.440601; “Structural connection of a pole shaft, in particular a lighting pole with its foundation, absorbing the impact of a motor vehicle” marked P.437494; “Steel pole for street lighting absorbing the energy of impact of a motor vehicle” marked P.440761.

The research was carried out in two stages. The first stage analysed the phenomena associated with the defragmentation of the lighting set for different impact speeds. In the second stage, based on the lessons learnt and the proposed design changes to the luminaire and pole, the effectiveness of the safety improvements (especially for pedestrians) was assessed. **This paper compares the results of three crash tests of lighting poles** with energy absorption levels – NE, LE and HE – performed at impact speeds of 70 and 100 km/h. During the test, the acceleration acting on the vehicle and the angle of rotation with respect to the vertical axis were recorded. For this purpose, a three-axis accelerometer was used along with a single-axis gyroscope. Data were recorded at 2000 Hz. Figure 2a shows the course of acceleration values acting on a vehicle during a collision, with an assumed initial speed of 100 km/h, with a pole with LE and NE energy absorption levels, and Figure 2b shows the course of acceleration values for a pole with HE, during an impact at 70 km/h, and a pole with LE during an impact at 100 km/h. The LE pole used in this study was classified as HE at 70 km/h, but at 100 km/h the requirement for the level of post-crash vehicle speed reduction was not met, leaving the pole at LE level.

From the data shown in Figure 2a, it can be seen that when colliding with a pole of energy absorption level LE with a target speed of 100 km/h, the maximum acceleration value was equal to -241 m/s^2 , corresponding to 24.58 g, while an acceleration value of -84 m/s^2

obciążeń statycznych słupa i drgań. Przy uderzeniu w słup, w warunkach określonych w PN-EN 12767 dla klasy NE, mechanizm zapewnia wypięcie słupa z zaczepów mocujących, a w efekcie spełnienie klasy NE zestawu słup-fundament. W przypadku klas bezpieczeństwa HE i LE zastosowano dodatkowy mechanizm linowo-sprężynowy, łączący stopę słupa z fundamentem, który w przypadku uderzenia w słup, w warunkach określonych w PN-EN 12767, powoduje wytłumienie energii uderzenia pojazdu. W tych rozwiązaniach odpowiednia klasa pochłaniania energii zderzenia ze słupem (NE, HE lub LE) jest realizowana przez fundament z odpowiednim mechanizmem.

Konstrukcja zestawu oświetleniowego obejmuje pięć nowatorskich rozwiązań zgłoszonych do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej. Obejmują one m.in. zgłoszenia patentowe pt. „Połączenie konstrukcyjne trzonu słupa, zwłaszcza oświetleniowego z jego fundamentem, amortyzujące uderzenia pojazdu samochodowego” oznaczone numerem P.435592; „Oprawa oświetleniowa” oznaczone numerem P.440349; „Osłona oprawy oświetleniowej” oznaczone numerem P.440601; „Połączenie konstrukcyjne trzonu słupa, zwłaszcza oświetleniowego z jego fundamentem, amortyzujące uderzenia pojazdu samochodowego” oznaczone numerem P. 437494; „Słup stalowy oświetlenia ulicznego amortyzujący energię uderzenia pojazdu samochodowego” oznaczone numerem P. 440761.

Badania zrealizowano dwuetapowo. W ramach pierwszego etapu analizowano zjawiska związane z defragmentacją zestawu oświetleniowego w przypadku różnych prędkości zderzeniowych. W drugim etapie na podstawie wyciągniętych wniosków i zaproponowanych zmian konstrukcyjnych oprawy oświetleniowej oraz słupa, dokonano

oceny skuteczności poprawy bezpieczeństwa (szczególnie pieszych). **W artykule porównano wyniki trzech testów zderzeniowych słupów oświetleniowych** o poziomach pochłaniania energii – NE, LE i HE, zrealizowane przy prędkości zderzenia 70 i 100 km/h. Podczas testu rejestrowano przyspieszenie działające na pojazd i kąt obrotu względem osi pionowej. W tym celu użyto trójosiowego akcelerometru wraz z jednoosiowym żyroskopem. Dane były rejestrowane z częstotliwością 2000 Hz. Rysunek 2a przedstawia przebieg wartości przyspieszenia działającego na pojazd w trakcie zderzenia, z zakładaną prędkością początkową 100 km/h, ze słupem o poziomie pochłaniania energii o LE i NE, a rysunek 2b przebieg wartości przyspieszenia w przypadku słupa o HE, w trakcie zderzenia z prędkością 70 km/h i słupa o LE w trakcie zderzenia z prędkością 100 km/h. Słup LE, użyty w tym badaniu, zaklasyfikowano jako HE w przypadku prędkości 70 km/h, ale przy prędkości 100 km/h nie zostało spełnione wymaganie dotyczące poziomu redukcji prędkości pojazdu po zderzeniu, co spowodowało, że słup pozostał na poziomie LE.

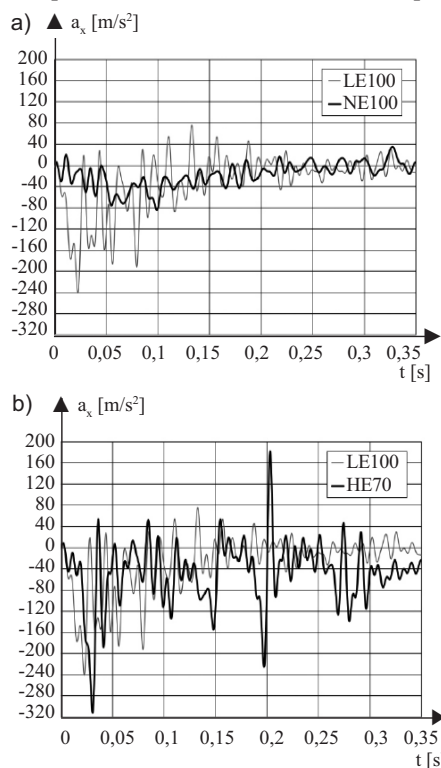


Fig. 2. Course of vehicle acceleration values as a function of time (description in the article)

Rys. 2. Przebieg wartości przyspieszenia pojazdu w funkcji czasu (opis w artykule)

(-8.57 g) was recorded when colliding with the NE pole. The maximum acceleration value was 2.87 times lower. The result obtained is as expected, due to the significantly lower level of energy absorption during a collision with the NE pole.

From the data shown in Figure 2b, the maximum acceleration value for a collision with the HE pole, at 70 km/h, is equal to -311.8 m/s^2 (-31.8 g). The study result presented is not as expected. For the acceleration waveform shown in the same figure for the LE pole and an impact speed of 100 km/h, the acceleration value was -241 m/s^2 (24.58 g). A video of the test was therefore analysed, showing that, probably at an impact speed of 70 km/h, the pole component came into contact with the vehicle chassis element at $t = 0.0305 \text{ s}$, getting deformed and eventually, at $t = 0.2 \text{ s}$, detaching from the ground. This was reflected in the course of the acceleration values. This component was probably under the vehicle chassis when detached, causing a further decrease in speed, as can be seen in Figure 2b. Despite the high instantaneous acceleration values recorded by the accelerometer, they had little effect on vehicle speed, as shown in Figure 2b. If the instantaneous changes in speed take on a high value, high acceleration values would act on the bodies of the crash participants, which could be dangerous.

In order to determine the course of the vehicle speed, the acceleration values were subjected to integration, according to formula (1). The resulting data are shown in Figure 3. The initial value of the vehicle speed, which is the constant C1 in formula (1), was determined by analysing the video.

$$v(t) = \int a(t)dt + C1 \quad (1)$$

where:

a – acceleration value;

C1 – integration constant determined from the initial vehicle speed.

As a result of the negative acceleration acting on the vehicle during the collision with the NE pole, its speed decreased at $t = 0.35 \text{ s}$ after the collision to 95.6 km/h (Figure 3a). At the same time, in the case of a collision with the LE pole, the vehicle's speed decreased to 66.9 km/h, which is in line with the expectations, since the LE pole absorbs more of the vehicle's kinetic energy than the NE pole, where energy absorption takes on a minimum value. Figure 3b shows a comparison of the vehicle speed waveform during a collision with the HE pole at a target speed of 70 km/h and a collision with the LE pole at a target speed of 100 km/h. In the case of an impact with an initial speed of 70 km/h (HE pole), there was a decrease in speed to 7.4 km/h after time $t = 0.35 \text{ s}$, while in the case of an impact with an initial speed of 100 km/h (LE pole), there was a decrease in speed to 66.9 km/h

Z danych przedstawionych na rysunku 2a wynika, że przy zderzeniu ze słupem o poziomie pochłaniania energii LE z prędkością docelową 100 km/h, maksymalna wartość przyspieszenia była równa -241 m/s^2 , co odpowiada 24,58 g, natomiast wartość przyspieszenia równą -84 m/s^2 (-8,57 g) zarejestrowano podczas zderzenia ze słupem o NE. Maksymalna wartość przyspieszenia była 2,87-krotnie mniejsza. Otrzymany wynik jest zgodny z oczekiwaniami, ze względu na zdecydowanie niższy poziom pochłaniania energii podczas zderzenia ze słupem o NE.

Z danych przedstawionych na rysunku 2b wynika, że maksymalna wartość przyspieszenia w przypadku zderzenia ze słupem o HE, przy prędkości 70 km/h jest równa $-311,8 \text{ m/s}^2$ (-31,8 g). Przedstawiony wynik badania nie jest zgodny z oczekiwaniami. W przypadku pokazanego na tym samym rysunku przebiegu przyspieszenia dla słupa o LE i prędkości zderzenia 100 km/h, wartość przyspieszenia wynosiła -241 m/s^2 (24,58 g). W związku z tym analizie poddano nagranie wideo z przeprowadzonego testu, z którego wynika, że prawdopodobnie w przypadku prędkości zderzenia 70 km/h, element słupa wszedł w czasie $t = 0,0305 \text{ s}$ w kontakt z elementem podwozia pojazdu, ulegając odkształceniu i ostatecznie, w czasie $t = 0,2 \text{ s}$, oderwaniu od podłoża. Znalazło to odzwierciedlenie w przebiegu wartości przyspieszenia. Element ten po oderwaniu znajdował się prawdopodobnie pod podwoziem pojazdu, powodując w dalszym ciągu spadek prędkości, co jest widoczne na rysunku 2b. Mimo wysokich chwilowych wartości przyspieszenia zarejestrowanych przez akcelerometr, nie miały one większego wpływu na prędkość pojazdu, co pokazano na rysunku 2b. W przypadku, gdyby chwilowe zmiany prędkości przyjmowały wysoką wartość, na ciała uczestników zderzenia działałyby wysokie wartości przyspieszeń, co mogłoby być niebezpieczne.

W celu określenia przebiegu prędkości pojazdu wartości przyspieszenia poddano całkowaniu, zgodnie ze wzorem (1). Uzyskane dane pokazano na rysunku 3. Początkową wartość prędkości pojazdu, stanowiącą stałą C1 we wzorze (1), określono na podstawie analizy nagrania wideo.

$$v(t) = \int a(t)dt + C1 \quad (1)$$

gdzie:

a – wartość przyspieszenia;

C1 – stała całkowania określona na podstawie początkowej prędkości pojazdu.

Na skutek przyspieszenia o ujemnej wartości, działającego na pojazd w czasie zderzenia ze słupem o NE, jego prędkość zmniejszyła się po $t = 0,35 \text{ s}$ od zderzenia do 95,6 km/h (rysunek 3a). W tym samym czasie, w przypadku zderzenia ze słupem o LE, prędkość pojazdu spadła do 66,9 km/h, co jest zgodne z oczekiwaniami, ponieważ słup o LE pochłania więcej energii kinetycznej pojazdu niż słup NE, w przypadku którego pochłanianie energii przyjmuje minimalną wartość. Na rysunku 3b przedstawiono porównanie przebiegu prędkości pojazdu w czasie zderzenia ze słupem

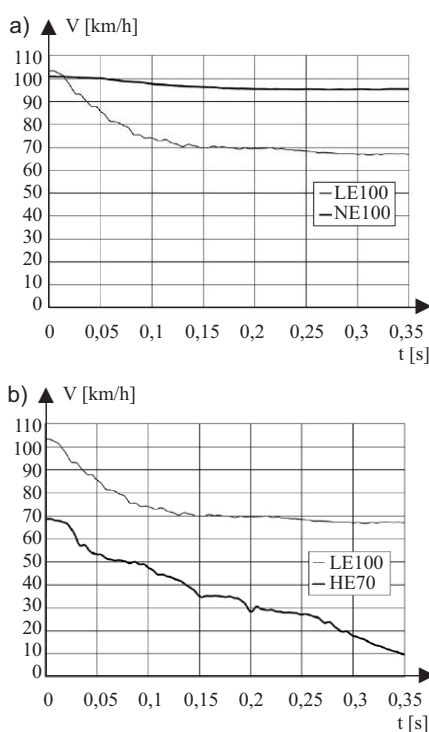


Fig. 3. Course of vehicle speed values as a function of time (description in the article)

Rys. 3. Przebieg wartości prędkości pojazdu w funkcji czasu (opis w artykule)

after $t = 0.35$ s. Such a significant decrease in speed was influenced by the event caused by the vehicle's contact with the pole, as described earlier.

The next stage of analyses involved **calculating the kinetic energy of the vehicle**. Based on knowledge of the vehicle's mass and instantaneous speed, the kinetic energy waveform was determined using the formula:

$$E_k(t) = \frac{mV^2(t)}{2} \quad (2)$$

where:

V – vehicle speed/prędkość pojazdu.

The waveform of the $E_k(t)$ value is shown in Figure 4. Analysis of the data shows that at the moment of impact with the tested lighting pole, the kinetic energy of the car was equal to 369.2 kJ for the NE pole and 386.9 kJ for the LE pole. The difference between the energy values is due to the slight difference in the vehicle's initial speed compared to the assumed speed of 100 km/h, which was, however, within the limits allowed by the standard. As a result of the collision, the kinetic energy of the vehicle decreased after $t = 0.35$ s for the NE pole to 331.4 kJ and for the LE pole to 162.5 kJ.

A comparison of the data presented in Figure 4b shows that the kinetic energy of a car going at 100 and 70 km/h is equal to 387 and 171.7 kJ respectively. During the collision, after $t = 0.2$ s, there was a decrease in E_k by an additional value. As previously noted, this was probably due to the pole being detached from the ground. Finally, after a time of 0.35 s, the energy of the vehicle was 162.5 and 2 kJ, for the LE pole and a speed of 100 km/h and the HE pole and a speed of 70 km/h, respectively.

The last value to be analysed was the **ASI coefficient** calculated according to formula (3). It is one of the most important parameters characterising protective barriers. The acceleration components taken into account in the calculations must be filtered according to the procedure in EN 1317. The course of the ASI value as a function of time is shown in Figure 5.

$$ASI(t) = \sqrt{\left(\frac{\ddot{a}_x(t)}{\ddot{a}_x}\right)^2 + \left(\frac{\ddot{a}_y(t)}{\ddot{a}_y}\right)^2 + \left(\frac{\ddot{a}_z(t)}{\ddot{a}_z}\right)^2} \quad (3)$$

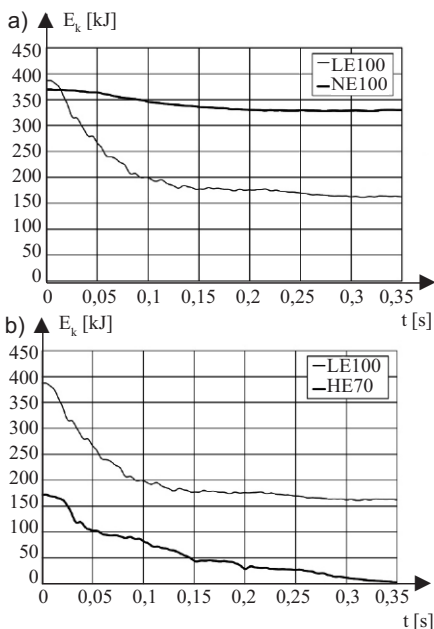


Fig. 4. Course of the vehicle's kinetic energy values as a function of time (description in the article)

Rys. 4. Przebieg wartości energii kinetycznej pojazdu w funkcji czasu (opis w artykule)

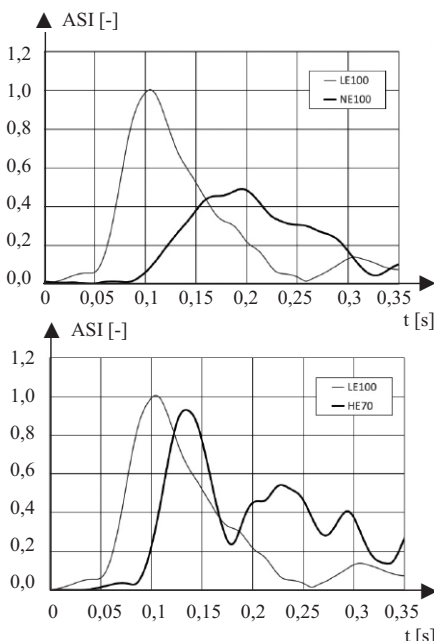


Fig. 5. Course of the value of the ASI coefficient

Rys. 5. Przebieg wartości współczynnika ASI

o HE, przy prędkości docelowej 70 km/h i zderzenia ze słupem o LE przy prędkości docelowej 100 km/h. W przypadku zderzenia z prędkością początkową 70 km/h (słup HE), po czasie $t = 0,35$ s odnotowano spadek prędkości do 7,4 km/h, natomiast w przypadku zderzenia z prędkością początkową 100 km/h (słup LE), po $t = 0,35$ s nastąpił spadek prędkości do 66,9 km/h. Na tak znaczny spadek prędkości miało wpływ opisanie wcześniej zdarzenie wywołane kontaktem pojazdu ze słupem.

Kolejny etap analiz obejmował **obliczenie energii kinetycznej pojazdu**. Na podstawie znajomości masy pojazdu i jego prędkości chwilowej wyznaczono przebieg energii kinetycznej, stosując wzór:

$$E_k(t) = \frac{mV^2(t)}{2} \quad (2)$$

gdzie: V – prędkość pojazdu.

Przebieg wartości $E_k(t)$ pokazano na rysunku 4. Z analizy danych wynika, że w chwili uderzenia w badany słup oświetleniowy, energia kinetyczna samochodu była równa 369,2 kJ w przypadku słupa NE i 386,9 kJ w przypadku słupa LE. Różnica między wartościami energii wynika z niewielkiej różnicy prędkości początkowej pojazdu względem zakładanej prędkości 100 km/h, które to wartości znajdowały się jednak w granicach dopuszczalnych przez normę. W wyniku zderzenia, energia kinetyczna pojazdu zmniejszyła się po $t = 0,35$ s w przypadku słupa NE do 331,4 kJ, a w przypadku słupa LE do 162,5 kJ.

Z porównania danych zaprezentowanych na rysunku 4b wynika, że energia kinetyczna samochodu poruszającego się z prędkością 100 i 70 km/h jest równa odpowiednio 387 i 171,7 kJ. W czasie zderzenia, po $t = 0,2$ s, nastąpił spadek E_k o dodatkową wartość. Jak już wcześniej zauważono, było to prawdopodobnie spowodowane oderwaniem słupa od gruntu. Ostatecznie, po czasie 0,35 s energia pojazdu wyniosła 162,5 i 2 kJ, odpowiednio dla słupa LE i prędkości 100 km/h oraz słupa HE i prędkości 70 km/h.

Ostatnią wartością, którą poddano analizie, był **współczynnik ASI** obliczony zgodnie z wzorem (3). Stanowi on jeden z najważniejszych parametrów charakteryzujących bariery ochronne. Uwzględnione w obliczeniach wartości składowych przyspieszenia muszą być poddane filtrowaniu zgodnie procedurą określoną w PN-EN 1317. Przebieg wartości ASI w funkcji czasu pokazano na rysunku 5.

$$ASI(t) = \sqrt{\left(\frac{\ddot{a}_x(t)}{\ddot{a}_x}\right)^2 + \left(\frac{\ddot{a}_y(t)}{\ddot{a}_y}\right)^2 + \left(\frac{\ddot{a}_z(t)}{\ddot{a}_z}\right)^2} \quad (3)$$

where:

$\hat{a}_x = 12 \text{ g}$; $\hat{a}_y = 9 \text{ g}$; $\hat{a}_z = 10 \text{ g}$ – limiting values for the components of acceleration along the x, y, z.

The calculated ASI values should be rounded off. Therefore, despite a maximum ASI value of 1.00408 for the LE pole and 100 km/h, a value of ASI = 1 is assumed for further considerations. Thus, as can be seen from the analysis of the data presented in Figure 5, in combination with the ranges of the ASI factor shown in Table 3, the intensity level of all crashes carried out should be classified as category A.

Summary

Appropriately designed support structures, in this case lighting poles, taking into account the guidelines in the EN 12767 standard, combined with a dedicated suitably prepared luminaire, serve to improve the safety of occupants in and out of vehicles. It is important to remember that a collision between a car and a pole not only results in a risk to the health and life of the driver and passengers, but also to other road users – pedestrians, cyclists, scooter users, motorcyclists, passengers, as well as passengers in vehicles with large windows, such as buses.

As mentioned, the EN 12767:2019 standard introduces four classes of energy absorption for support structures: class 0, which is characterised by no passive safety features; NE (*Non Energy*); LE (*Low Energy*) and HE (*High Energy*). Depending on the value of the speed decrease after the impact, the support structure falls into one of the four categories. These values are set out in Table 1. For the three crash tests described in the paper, the speed values shown in Figure 3 and the decrease in instantaneous speed, immediately after the crash, were obtained respectively:

- for the NE pole and an initial speed of 100 km/h, a drop in speed to 95.6 km/h immediately after impact and 94.5 km/h at a distance of 12 m from the pole;
- for the LE pole and an initial speed of 100 km/h, a drop in speed to 66.9 km/h immediately after impact and 62.9 km/h at a distance of 12 m from the pole;
- for the HE pole and an initial speed of 70 km/h, a drop in speed to 7.4 km/h immediately after impact and 0 km/h (vehicle stop) at a distance of 12 m from the pole.

According to the requirements of the EN 12767:2019 standard (Table 1), the post-crash speed, at a distance of 12 m from the tested support structure, should reach a value:

- $70 < v_c \leq 100 \text{ km/h}$ for the NE pole and an initial speed of 100 km/h;
- $50 < v_c \leq 70 \text{ km/h}$ in the case of the LE pole and an initial speed of 100 km/h;
- $0 < v_c \leq 5 \text{ km/h}$ in the case of the HE pole and an initial speed of 70 km/h.

The crash tests carried out confirmed the design assumptions, as the standardised decrease in vehicle speed after driving 12 m from the pole was achieved. In addition, the luminaire, thanks to the special solutions used, has retained its integrity, so that none of its components threaten the safety of people who would be in the vicinity of the lamp during a crash under real conditions.

gdzie:

$\hat{a}_x = 12 \text{ g}$; $\hat{a}_y = 9 \text{ g}$; $\hat{a}_z = 10 \text{ g}$ – graniczne wartości składowych przyspieszenia wzdłuż osi nadwozia x, y, z.

Obliczone wartości współczynnika ASI należy zaokrąglić. W związku z tym, mimo maksymalnej wartości ASI dla słupa LE i 100 km/h wynoszącej 1,00408, do dalszych rozważań przyjmowana jest wartość ASI = 1. Zatem, jak wynika z analizy danych przedstawionych na rysunku 5, w połączeniu z zakresami współczynnika ASI przedstawionymi w tabeli 3, poziom intensywności wszystkich przeprowadzonych zderzeń należy zakwalifikować do kategorii A.

Podsumowanie

Odpowiednio zaprojektowane konstrukcje wsporcze, w tym przypadku słupy oświetleniowe, przy uwzględnieniu wytycznych zawartych w normie EN 12767, w połączeniu z dedykowaną odpowiednio przygotowaną oprawą oświetleniową, służą poprawie bezpieczeństwa osób znajdujących się w pojazdach i poza nimi. Należy pamiętać, że zderzenie samochodu ze słupem skutkuje nie tylko zagrożeniem zdrowia i życia kierowcy oraz pasażerów, ale też innych uczestników ruchu drogowego – pieszych, rowerzystów, użytkowników hulajnóg, motocyklistów, pasażerów, jak również pasażerów pojazdów z dużymi oknami, np. autobusów.

Jak wspomniano, w normie PN-EN 12767:2019 wprowadzono cztery klasy pochłaniania energii przez konstrukcje wsporcze: klasę 0, którą charakteryzuje brak cech bezpieczeństwa biernego; NE (*Non Energy*); LE (*Low Energy*) oraz HE (*High Energy*). W zależności od wartości spadku prędkości po zderzeniu, konstrukcję wsporczą zalicza się do jednej z wymienionych czterech kategorii. Wartości te określono w tabeli 1. W przypadku opisanych w artykule trzech testów zderzeniowych uzyskano wartości prędkości przedstawione na rysunku 3 i spadek prędkości chwilowej, bezpośrednio po zderzeniu, odpowiednio:

- dla słupa NE i prędkości początkowej 100 km/h, spadek prędkości do 95,6 km/h bezpośrednio po zderzeniu i 94,5 km/h w odległości 12 m od słupa;
- dla słupa LE i prędkości początkowej 100 km/h, spadek prędkości do 66,9 km/h bezpośrednio po zderzeniu i 62,9 km/h w odległości 12 m od słupa;
- dla słupa HE i prędkości początkowej 70 km/h, spadek prędkości do 7,4 km/h bezpośrednio po zderzeniu i 0 km/h (zatrzymanie pojazdu) w odległości 12 m od słupa.

Zgodnie z wymaganiami stawianymi przez PN-EN 12767:2019 (tabela 1) prędkość po zderzeniu, w odległości 12 m od badanej konstrukcji wsporczej, powinna osiągnąć wartość:

- $70 < v_c \leq 100 \text{ km/h}$ w przypadku słupa NE i prędkości początkowej 100 km/h;
- $50 < v_c \leq 70 \text{ km/h}$ w przypadku słupa LE i prędkości początkowej 100 km/h;
- $0 < v_c \leq 5 \text{ km/h}$ w przypadku słupa HE i prędkości początkowej 70 km/h.

Przeprowadzone testy zderzeniowe potwierdziły założenia projektowe, ponieważ osiągnięto zakładany w normie spadek prędkości pojazdu po przejechaniu 12 m od słupa. Ponadto oprawa oświetleniowa, dzięki zastosowanym specjalnym rozwiązaniom zachowała integralność, w związku z czym żaden z jej elementów nie zagraża bezpieczeństwu osób, które znalazłyby się w pobliżu lampy podczas zderzenia w warunkach rzeczywistych.

The current procedures in Poland for testing lighting sets for the safety of road users involved in a vehicle hitting a pole focus on the safety of the driver and passengers. It should be emphasised that those involved in a collision with a pole are additionally protected by in-car safety systems such as airbags, seatbelts and seatbelt pretensioners, respectively selected interior padding materials, reinforced vehicle frame structure to absorb part of the impact force, etc.

The design solution of the Safe Lighting Point takes into account the safety of vulnerable road users in the event of an accelerated vehicle hitting a pole. In the event of a different speed collision between a car and a pole, its components are not defragmented or the extent and destructive effect of the parts of the lighting set detached from the pole is definitely reduced. It is particularly advisable to use the innovative BPO solution in urbanised urban zones with intensive pedestrian traffic and in areas of pedestrian accumulation (pedestrian crossings).

The knowledge gathered during the research will allow future design guidelines to be formulated for lighting sets that improve pedestrian traffic safety and a method of verifying these designs, particularly in terms of the impact of lighting set elements on all road users.

The project was co-financed by the National Centre for Research and Development as part of the Operational Programme Intelligent Development 2014 – 2020 entitled “Industrial research and experimental development work on the development of a safe lighting point” (POIR. 04.01.04-000147/17).

Received: 03.02.2024
Revised: 13.06.2024

Obowiązujące obecnie w Polsce procedury badań zestawów oświetleniowych pod kątem bezpieczeństwa uczestników ruchu drogowego uczestniczących w uderzeniu pojazdu w słup skupiają się na bezpieczeństwie kierowcy i pasażerów. Należy podkreślić, iż ci uczestnicy zderzenia ze słupem są dodatkowo zabezpieczeni samochodowymi systemami bezpieczeństwa, takimi jak poduszki powietrzne, pasy i napinacze pasów bezpieczeństwa, odpowiednio dobrane materiały wyścielające wnętrze pojazdu, wzmocniona konstrukcja szkieletu pojazdu pochłaniająca część siły zderzenia itd.

Rozwiązanie konstrukcyjne Bezpiecznego Punktu Oświetleniowego uwzględnia bezpieczeństwo niechronionych uczestników ruchu drogowego w przypadku uderzenia rozjeżdżonego pojazdu w słup. W przypadku różnej prędkości zderzenia samochodu ze słupem jego elementy składowe nie ulegają defragmentacji lub zdecydowanie ograniczony jest zasięg i niszczące działanie części zestawu oświetleniowego oderwanych od słupa. Szczególnie wskazane jest stosowanie nowatorskiego rozwiązania BPO w zurbanizowanych strefach miejskich z intensywnym ruchem pieszych oraz w miejscach kumulacji pieszych (przejścia dla pieszych).

Zgromadzona w trakcie badań wiedza pozwoli sformułować w przyszłości wytyczne konstrukcyjne zestawów oświetleniowych poprawiających bezpieczeństwo komunikacyjne pieszych oraz metodę weryfikacji tych konstrukcji, szczególnie w aspekcie oddziaływania elementów zestawu oświetleniowego na wszystkich uczestników ruchu drogowego.

Projekt był współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 pt. „Badania przemysłowe i eksperymentalne prace rozwojowe nad opracowaniem bezpiecznego punktu oświetleniowego” (POIR. 04.01.04-00-0147/17).

Wpłynął do redakcji: 03.02.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 13.06.2024 r.

Literature

- [1] Jeong E, Oh Ch. Evaluating the effectiveness of active vehicle safety systems. *Accident Analysis & Prevention*. 2017; doi.org/10.1016/j.aap.2017.01.015.
- [2] Bhalla K, Gleason K. Effects of vehicle safety design on road traffic deaths, injuries, and public health burden in the Latin American region: a modelling study. *The Lancet Global Health*. 2020; DOI: 10.1016/S2214-109X(20)30102-9.
- [3] Jedliński T, Buśkiewicz J, Fritzkowski P. Numerical and Experimental Analyses of a Lighting Pole in Terms of Passive Safety of 100HE3 class, Vibrations in Physical Systems. 2020; DOI 10.21008/j.0860-6897.2020.3.07.
- [4] Pawlak M. The Acceleration Severity Index in the impact of a vehicle against permanent road equipment support structures. *Mechanics Research Communications*. 2016; 77: 21 – 28.
- [5] Fatmi MR, Habib MA. Modeling vehicle collision injury severity involving distracted driving: assessing the effects of land use and built environment. *Transportation research record*. 2019; doi.org/10.1177/0361198119849060.
- [6] Eluru N, Bagheri M, Miranda-Moreno LF, Fu L. A latent class modeling approach for identifying vehicle driver injury severity factors at highway-railway crossings. *Accident Analysis & Prevention*. 2012; doi.org/10.1016/j.aap.2012.01.027.
- [7] Wood DP, Simms CK, Walsh DG. Vehicle-pedestrian collisions: Validated models for pedestrian impact and projection. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2005; doi: 10.1243/095440705X6703.
- [8] Huang J, Peng Y, Yang J, Otte D, Wang B. A study on correlation of pedestrian head injuries with physical parameters using in-depth traffic accident data and mathematical models. *Accident Analysis & Prevention*. 2018; doi.org/10.1016/j.aap.2018.07.012.
- [9] PN-EN 1317 Systemy ograniczające droge.

- [10] Kamiński T. Zrównoważona mobilność w aspekcie inteligentnych rozwiązań w transporcie, WKŁ, 2021.
- [11] Komenda Główna Policji Biuro Ruchu Drogowego, Wypadki drogowe w Polsce w roku 2019 Warszawa, 2020.
- [12] Komenda Główna Policji Biuro Ruchu Drogowego, Wypadki drogowe w Polsce w roku 2014 Warszawa, 2015.
- [13] Komenda Główna Policji Biuro Ruchu Drogowego, Wypadki drogowe w Polsce w roku 2015 Warszawa, 2016.
- [14] Komenda Główna Policji Biuro Ruchu Drogowego, Wypadki drogowe w Polsce w roku 2016 Warszawa, 2017.
- [15] Komenda Główna Policji Biuro Ruchu Drogowego, Wypadki drogowe w Polsce w roku 2017 Warszawa, 2018.
- [16] Komenda Główna Policji Biuro Ruchu Drogowego, Wypadki drogowe w Polsce w roku 2018 Warszawa, 2019.
- [17] Komenda Główna Policji Biuro Ruchu Drogowego, Wypadki drogowe w Polsce w roku 2019 Warszawa, 2020.
- [18] Komenda Główna Policji Biuro Ruchu Drogowego, Wypadki drogowe w Polsce w roku 2020 Warszawa, 2021.
- [19] Komenda Główna Policji Biuro Ruchu Drogowego, Wypadki drogowe w Polsce w roku 2021 Warszawa, 2022.
- [20] Komenda Główna Policji Biuro Ruchu Drogowego, Wypadki drogowe w Polsce w roku 2022 Warszawa, 2023.
- [21] <https://www.krbrd.gov.pl/narodowy-program-brd-2021-2030>.
- [22] Wicher E, Kucharski D. Comparison of safety barrier parameters in the case of double impact at the same location. *Roads and Bridges*. 2021; DOI: 10.7409/rabd.021.020.
- [23] PN-EN 12767: 2019 Bierne bezpieczeństwo konstrukcji wsporczych dla urządzeń drogowych – Wymagania i metody badań.