

Kryteria oceny bezpieczeństwa przed skutkami zderzeń dla pojazdów szynowych do transportu osobowego

W artykule przedstawiono kryteria bezpieczeństwa przed skutkami zderzeń dla pojazdów szynowych przeznaczonych do transportu osobowego, do których zalicza się: wagony osobowe, zespoły trakcyjne kolei miejskiej (w tym pojazdy metra), do ruchu lokalnego i regionalnego, tramwaje oraz autobusy szynowe. Główny nacisk położono na bezpieczeństwo pasażerów podczas procesów zderzeń pojazdów szynowych i na kryteria jakie powinny być spełnione, aby zapewnić bezpieczeństwo pasażerom podczas ewentualnych zderzeń.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005÷2007 jako projekt badawczy pt. „Teoretyczne i techniczne możliwości kształtowania stref zgniotu ustrojów noszących pojazdy szynowych.”

1. Wstęp

Kryteria oceny zderzeń, przedsięwzięcia konstrukcyjne oraz materiałowe, zabezpieczające strukturę pojazdu szynowego przed skutkami zderzeń dotyczyły w dotychczasowych publikacjach projektu badawczego [4, 5 i 6] wagonów towarowych. Zwrócono jednak w nich uwagę, że kryteria stawiane pojazdom szynowym przed skutkami zderzeń zależą również od ich przeznaczenia. Zapewnienie bezpieczeństwa w trakcie „zderzeń nadzwyczajnych” dla pojazdów szynowych przeznaczonych dla przewozów osobowych jest trudniejsze, gdyż ich konstrukcja podczas procesu zderzenia musi zapewnić bezpieczeństwo pasażerów i personelu obsługującego, które sprowadza się do uniknięcia jakichkolwiek obrażeń oraz wypadków śmiertelnych. Zgodnie z dotychczas obowiązującymi przepisami dla wagonów osobowych, przy ich konstruowaniu należy brać pod uwagę jedynie sprężyste zakres odkształceń przy występowaniu obciążeń statycznych. Uwzględniają one również obciążenie, które wynika z sił występujących przy prędkościach nabiegania do 10 km/h (2,77 m/s) zgodnie z kartą UIC 566 [17]. Jak wynika z dotychczasowych doświadczeń eksploatacyjnych zachowanie się konstrukcji wagonu osobowego jest zadawalające, jeśli prędkość zderzenia (nabiegania) znajduje się w przedziale 10 do 20 km/h (2,77 do 5,55 m/s)[25]. Powyżej prędkości 20 km/h występują już uszkodzenia w konstrukcji pojazdu, które mogą wywołać ciężkie obrażenia pasażerów. W związku z tym w ostatnich latach międzynarodowe organizacje kolejowe oraz normalizacyjne jak ERRI, UIC oraz CEN postanowiły podnieść rolę „pasywnego bezpieczeństwa” pojazdów osobowych do rangi obowiązkowej oraz sformułowały wytyczne i kryteria dotyczące tej problematyki [17,22,23,24 i 25]. Zgodnie z raportem ERRI B106/Rp.20 [25] w celu opracowania miarodajnych wytycznych oraz kryteriów oceny ustalono najpierw podstawowe definicje doty-

czące zderzeń. Stwierdzono, że zdefiniowanie zderzenia (wypadku) nie jest możliwe bez podania warunków, podczas których pojazd będzie wykazywał zachowanie zgodne z założeniami. Niebezpieczeństwa kolizji i związane z tym zagrożenie dla pasażerów można podzielić na dwie kategorie:

- niebezpieczeństwo „kategorii pierwszej” przy zderzeniu czołowym z „wspinaniem się” pojazdu lub bez
- niebezpieczeństwo „kategorii drugiej” przy zderzeniu i w następstwie wykolejeniu się i zdeformowaniu się składu pociągu w kształcie litery „S”.

2. Definicje i analiza podstawowych pojęć związanych ze zderzeniami

2.1. Kategorie zderzenia

Zderzenie w kierunku wzdłużnym występuje najczęściej. Jak wynika z praktyki eksploatacyjnej nie można jednak całkowicie wykluczyć zderzenia w kierunku bocznym. Przewrócenia się pojazdu nie uwzględniono w artykule.

Do dalszych rozważań przyjęto następujące kategorie zderzeń:

- zderzenie czołowe
- zderzenie boczne
- zderzenie w kierunku pionowym.

2.2. Prędkość zderzenia

Analiza parametru w świetle doświadczeń eksploatacyjnych

Z analizy 83 wypadków zgłoszonych przez koleje brytyjskie BR wynika, że:

- w przypadku 36 zderzeń czołowych pociągów osobowych (bez wykolejeń) odnotowano 13 wypadków śmiertelnych

- w 10 przypadkach pojazdy zderzyły się tak, że wagony składu wjechały między siebie; energia kinetyczna w dziewięciu przypadkach wynosiła poniżej 25 MJ, co dla pociągu o masie równej 400 t odpowiada prędkości mniejszej niż 40 km/h (11m/s)
- w przypadkach kiedy nie wystąpiło zjawisko „wspinania się” pojazdu energia kinetyczna pojazdu wynosiła powyżej 25 MJ
- w przypadku zderzenia ze „wspinaniem się” pojazdu energia kinetyczna pojazdu wynosiła 45 MJ, co odpowiada prędkości 54 km/h (15m/s) dla pociągu o masie 400 t
- 32 zderzenia doprowadziły do wykolejeń, które spowodowały 25 wypadków śmiertelnych
- najwięcej wypadków zderzeń wystąpiło przy prędkości poniżej 40 km/h [7].

Formułując definicję prędkości zderzenia, przy której zachowane jest pasywne bezpieczeństwo wagonu osobowego, rozważano inne środki komunikacji jak np. komunikacja lotnicza czy samochodowa.

Z analizy wypadków przeprowadzonych dla transportu lotniczego, dla którego sporządzono tzw. diagram przeżycia (niem. „Überlebensdiagramm”, ang. „survivable space diagram”) wynika, że pasażerowie nie są chronieni przed skutkami zderzenia czołowego przy prędkości samolotu powyżej 54 km/h (15m/s) i maksymalnej prędkości w kierunku pionowym wynoszącej 33 km/h (9,16 m/s) [8]. W przypadku komunikacji samochodowej maksymalna prędkość, która stwarza zagrożenie dla pasażerów przy zderzeniu czołowym wynosi w zależności od autora 48 do 55 km/h (13,33 do 15,27 m/s) [25]. W przypadku bocznego zderzenia zauważono, że niebezpieczeństwo wypadku dla podróżnego zwiększa się wyraźnie od 30 km/h (8,33 m/s) i przy prędkości 45 km/h (12,5m/s) osiąga prawdopodobieństwo równe prawie 100%. Zderzenia w transporcie lotniczym w kierunku pionowym występują w formie nagłego uderzenia, wywołującego utratę mocy napędowej. W komunikacji samochodowej (samochody osobowe, omnibusy) zderzeniom bocznym towarzyszyły przeważnie przypadki przewrócenia pojazdu. W normie SAE J 374 [19] przedstawiono próby ze zjawiskiem wciśnięcia dachu. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że autorzy tej normy z uwagi na trudności związane z ustaleniem normatywnej prędkości zderzenia wyszli z założenia, że należy zdefiniować próbę statyczną. Z kolei w normie SAE J 996 [21] ustalono próbę spadania na dach. W przypadku komunikacji kolejowej trzeba się liczyć z tym, że wystąpi wykolejenie z ostatecznym przewróceniem się wagonu osobowego na dach. Wg innych koncepcji pojazdy szynowe w trakcie zderzenia bocznego upadają w większości przypadków na bok (nie przewracając się na dach) co prowadzi do bardziej prawidłowych rozwiązań. (prawdopodobnie

do uprzywilejowania konstrukcji pojazdu z nośnymi elementami rurowymi, powodując zwiększenie wytrzymałości dachu).

W wyniku analizy przypadków referencyjnych ustalenie prędkości zderzenia ma zasadnicze znaczenie z uwagi na to, że:

- ustalona prędkość zderzenia ma związek z możliwą awarią aktywnych urządzeń sygnalizacyjnych
- ustalona prędkość prowadzi do technicznych rozwiązań, których efektywność przy tej prędkości wprawdzie byłaby optymalna, jednakże nie da się rozszerzyć na inny zakres tzn. pojazd posiadający optymalną konstrukcję dla prędkości 50 km/h (13,88 m/s) nie musi sprawdzać się dla prędkości zderzenia 100 km/h (27,77 m/s)
- ustalona prędkość zderzenia powoduje zmianę przepisów dotyczących wymiarowania pojazdów, co może prowadzić do zwiększenia masy a zatem wzrostu kosztów wykonania i eksploatacyjnych; taki przypadek może wystąpić, jeśli prędkość zderzenia zostanie ustalona na zbyt wysokim poziomie.

W tabeli 1 przedstawiono kilka wyników obliczeń energii przejętej podczas zderzenia czołowego dwóch niehamowanych pociągów o masie 400 t.

Zestawienie przejętej energii podczas zderzenia dwóch pociągów osobowych o masie 400 t każdy

Tabela 1

L.p.	Prędkość podczas zderzenia [m/s]	Energia kinetyczna [kJ]	Energia przejęta przez konstrukcję [kJ]	Długość strefy zniszczenia dla jednego pociągu [m]
1.	10	10 000	10 000	2,5
2.	45	45 000	22 500	5,6
3.	80	80 000	40 000	10

Energia przejęta w zakresie całkowicie plastycznym (w odróżnieniu od energii kinetycznej najeżdżającego pociągu i resztkowej energii obydwu pociągów po zderzeniu) prowadzi do projektowania konstrukcji ze strefami przejmowania energii, które odpowiadają zderzeniu z prędkością 34 km/h (9,44 m/s) i odkształceniu stref kontrolowanego zniszczenia w zakresie 2,5 m. Jak wynika z tabeli 1 im większa prędkość zderzenia, tym większy zakres odkształcenia plastycznego, ale również zwiększa się ryzyko „unoszenia” się pojazdu. Przy większych prędkościach nie można ograniczyć ryzyka zwiększenia deformacji przedziałów dla podróżnych ze względu na poważne rozmiary odkształcenia stref kontrolowanego zgniotu. Przy rozważaniach dopuszczalnej prędkości zderzeń czołowych jako pierwszą wartość zaproponowano 54 km/h (15 m/s), w celu zrównania kryteriów przyjętych

w komunikacji samochodowej. Ostatecznie zgodnie z pr EN 15227 [22] dla pojazdów szynowych kategorii I do IV jako miarodajną prędkość zderzenia przyjęto 36 km/h (10 m/s), natomiast dla pojazdów kategorii V (tramwaje) 15 km/h (4,16 m/s).

Analiza zderzenia bocznego pojazdu szynowego z masztem trakcyjnym sieci jezdnej

W wyniku przeprowadzonych analiz, za prędkość zderzenia bocznego z masztem trakcyjnym sieci jezdnej uznano prędkość 9,4 km/h (2,6 m/s), przy której przeważa quasistatyczny efekt zderzenia. Rozpatrując uproszczony model zderzenia bocznego wagonu osobowego z masztem bilans energetyczny zderzenia można opisać za pomocą równania:

$$W_{CV} = W_{CP} + W_{DP} + W_{DV} \quad (1)$$

gdzie:

- W_{CV} - energia kinetyczna wagonu osobowego
- W_{CP} –energia kinetyczna masztu trakcyjnej sieci jezdnej
- W_{DP} - energia plastycznej deformacji masztu trakcyjnego sieci jezdnej
- W_{DV} - energia plastycznej deformacji wagonu osobowego.

Przy prędkości zderzenia wynoszącej 9,4 km/h (2,6 m/s) i masie wagonu osobowego w stanie próżnym 44 t, jego energia kinetyczna wynosi $W_{CV}=150$ kJ. Wychodząc z założenia, że wytrzymałość masztu trakcyjnego sieci jezdnej jest stała, to energię plastycznej deformacji obliczonej za pomocą oprogramowania ANSYS w zależności od jego odkształcenia d_p wyraża się wzorem:

$$W_{DP}=1,5 \cdot 10^5 d_p - 750 \text{ dla } d_p > 0,01 \text{ m} \quad (2)$$

W analogiczny sposób ustalono plastyczną energię deformacji wagonu wychodząc z założenia, że wielkość deformacji wagonu wynosi d_V oraz wielkości odkształceń plastycznych d_V oraz d_p są w zależności proporcjonalnej wg wzoru:

$$W_{DV} = W_{DP} \cdot \frac{d_V}{d_p} \quad (3)$$

Energię kinetyczną zgromadzoną w maszcie trakcyjnym sieci jezdnej można ustalić pod warunkiem, że:

- wahania prędkości pojazdu mają liniowy przebieg
- prędkość zderzenia zostaje przeniesiona z wysokości ostoi (podwozia) wagonu na maszt sieci trakcyjnej
- rodzaj zniszczenia masztu trakcyjnej sieci jezdnej zależy od wystąpienia plastycznego przegubu na zakotwiczeniu, ponieważ maszt poza tym przegubem jest sztywny.

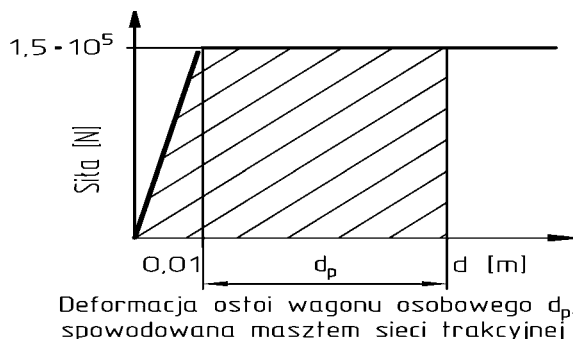
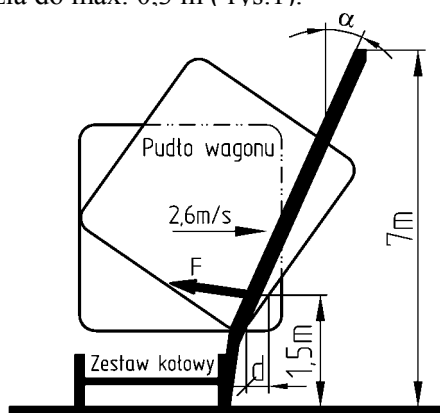
Ostatecznie można przyjąć, że przy $d_p > 0,01 \text{ m}$ obowiązuje zależność:

$$1,5 \cdot 10^5 = 0,1 \cdot 10^5 + 1,5 \cdot 10^5 \cdot (d_p + d_V) - 750 \cdot \left(1 + \frac{d_V}{d_p}\right) \quad (4)$$

Jeśli przyjąć ze względów bezpieczeństwa dla podróży $d_V = 0,3 \text{ m}$ wówczas równanie (4) przyjmuje postać:

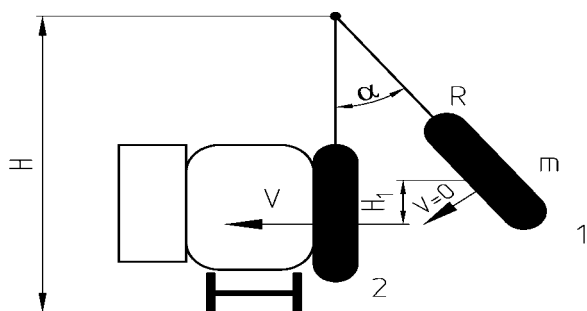
$$1,5 \cdot 10^5 \cdot d_p^2 - 94250 \cdot d_p - 225 = 0 \quad (5)$$

Równanie (5) posiada jedno rozwiązanie mające sens techniczny tzn. $d_p = 0,631 \text{ m}$, co odpowiada kątowi pochylenia masztu sieci trakcyjnej wynoszącemu $\alpha = 22^\circ$ (rys.1). Model obliczeniowy ogranicza przesunięcie punktu styku masztu sieci jezdnej i podwozia wagonu do $d = 0,7 \text{ m}$ oraz wielkość deformacji bocznej nadwozia do max. 0,3 m (rys.1).



Rys.1. Zderzenie wagonu osobowego z masztem sieci trakcyjnej

Kolejnym przypadkiem, który należy rozważyć, jest uderzenie boczne z przeszkodą w postaci wahadła (rys.2).



Rys.2. Zderzenie wagonu osobowego z elementem o masie m w postaci wahadła

Zderzenie z wagonem osobowym wywołuje masa w postaci wahadła odchylnego od pionu pod kątem α i przemieszczająca się z pozycji 1 do położenia 2. Boczna prędkość zderzenia z wagonem osobowym w pozycji 2 wynosi:

$$v = \sqrt{2gR \cdot (1 - \cos \alpha)} \quad (6)$$

gdzie:

g- przyspieszenie ziemskie [9,81 m/s²]

R- promień wahadła [m].

Jeśli podstawimy prędkość zderzenia wynoszącą $v=2,6$ m/s (9,4 km/h), to wówczas otrzymuje się wysokość H_1 po zderzeniu wynoszącą:

$$H_1 = R \cdot (1 - \cos \alpha) = 0,345m \quad (7)$$

Jeśli przyjmie się, że wysokość H nie wynosi więcej niż 10 m, wówczas można wyjść z założenia, że $R=7$ m, co w tym przypadku daje $\alpha=18,2^\circ$. Ponieważ energia kinetyczna wagonu osobowego w stanie próżnym o masie 44t przy prędkości $v=2,6$ m/s jest równa 0,15 MJ, aby wywołać taki sam efekt zderzenia jak w przypadku poprzednim, musiałaby masa uderzającego wahadła m odpowiadać masie wagonu osobowego, co należy zaliczyć do przypadków hipotetycznych i rzadko spotykanych w rzeczywistości. Taka próba byłaby interesująca, gdyby chciało się zbadać dynamikę uderzenia skierowanego w stronę manekinów, znajdujących się po przeciwnej stronie względem strony bocznej na wysokości zderzenia. Jak wynika z praktyki, zrealizowanie takiej próby mogłoby się okazać trudne, aby dokonać symulacji zderzenia odpowiadającemu w rzeczywistości deformacji plastycznej, pochłaniającej trzecią część energii tzn. taka próba nie posiada miarodajnej, wystarczającej siły.

Kolejnym zagadnieniem, które należy przeanalizować, jest sformułowanie kryteriów dla bocznych zderzenia nie wywołującego większej deformacji niż 0,3 m, skierowanej do wnętrza pudła wagonu. Jak wynika z dotychczasowego stanu wiedzy przypadek ten wymaga badań doświadczalnych, aby można było opracować odpowiednie normy w tym zakresie [25].

Jako próby kwalifikacyjne dla pojazdów gwarantujących „pasywne bezpieczeństwo” przed skutkami zderzeń zaproponowano, aby próby zderzenia realizować jako próby zderzenia czołowego, w formie zderzenia pociągu jadącego z prędkością 54 km/h (15m/s) na stojący pociąg w stanie niezahamowanym. Kryteria odbiorcze odpowiedniego pojazdu zależą od kryteriów biomechanicznych i od kryteriów zachowania konstrukcji. Kryteria biomechaniczne zostały sformułowane w zależności od wyników pomiarów wykonanych na manekinach, symulujących pasażerów. W tym przypadku należy zwrócić uwagę na paradoksalną sytuację bezpieczeństwa w komunikacji samochodowej w stosunku do bezpieczeństwa w pojazdach szynowych. Dzięki rozległym staraniom, dotyczącym bezpieczeństwa pasażerów przy zderzeniu czołowym i bocznym, udało się w przemyśle samochodowym

wyprodukowanie bezpiecznych samochodów, pomimo że pomiary dokonane na manekinach wykazały, iż przyspieszenia przekraczają wartości 100g (981 m/s²). Jednocześnie w wypadkach kolejowych zdarzały się ciężkie obrażenia pasażerów, pomimo że obliczone opóźnienia wykazywały wartości mniejsze niż 10g (98,1 m/s²). Stąd też wynikała potrzeba opracowania takich metod obliczeń, które gwarantują brak obrażeń pasażerów znajdujących się w przedziałach dla podróży w przypadku ewentualnego zderzenia pojazdu. Urządzenia wyposażenia wewnętrznego pojazdu muszą być tak ukształtowane, aby obrażenia pasażera przy powtórnych uderzeniach o urządzenie z jego przedziału były w dopuszczalnych granicach.

2.3. Biomechanika i jej podstawowe pojęcia

Biomechanika jest nauką zachowania się ciała ludzkiego w przypadku działania na niego różnych obciążeń. Biomechanika zderzenia jest częścią składową biomechaniki, która zajmuje się reakcją ciała ludzkiego na siły i przyspieszenia, wynikające ze zderzenia. Ten zakres w ogólnym przypadku można podzielić na trzy dziedziny:

- reakcje mechaniczne
- mechanizm obrażeń
- poziom tolerancji.

W związku z tym zwrócono uwagę w amerykańskich przepisach na to, że poziom tolerancji amplitudy sygnału przedstawia określony stopień obrażeń, podczas gdy przy specyfikacji dotyczącej tolerancji chodzi o ustaloną dowolną odporność na zderzenia. Koncepcja bezpiecznego wyposażenia odpowiada stopniowi umiarkowanego lub małego zranienia. Mechaniczne zachowanie ciała ludzkiego i innych żywych istot można tak dokładnie uzasadnić, jak innych konstrukcji, jeśli zastosuje się **pomiary przyspieszenia, prędkości, przemieszczeń oraz deformacji**, a wyniki pomiarów powiąże się z siłami powodującymi te procesy. Za pomocą jednej ze zmiennych wielkości, które charakteryzują mechaniczną reakcję, można dokonać próby oszacowania prawdopodobnej wielkości ewentualnych obrażeń, wskutek czego **można ustalić związek pomiędzy występującymi zmiennymi wielkościami fizycznymi oraz stopniem obrażeń pasażerów**. Ze względu na wiele organów, z których składa się ciało człowieka i możliwych rodzajów obciążeń, nie można ustalić żadnego ogólnego kryterium dla stanu pasażera po zderzeniu. Przy wielu obrażeniach każde z nich posiada swoją własną ważkość i stosowanie metody superpozycji przez dodawanie stopni ciężkości nie stwarza żadnego obrazu ogólnego stanu poszkodowanych. W przypadku wielu obrażeń każde z nich posiada swój własny stopień ciężkości. W celu oceny obrażeń z wypadków ulicznych wykorzystuje się tabelę obrażeń, wyrażonych w stopniach AIS (ang. „Abbreviate Injury Scale”). Odpowiednie stopnie (kategorie) AIS są przedstawione w tabeli 2.

Zestawienie stopni (kategorii) obrażeń AIS [25]

Tabela 2

L.p.	Nr kodu AIS	Opis kategorii obrażenia
1	1	małe
2	2	przeciętne
3	3	poważne
4	4	ciężkie
5	5	krytyczne (szanse przeżycia niepewne)
6	6	maksymalne (praktycznie przypadek śmiertelny)
7	9	nieznane

Porównując obrażenia przy wypadkach ulicznych w skali AIS należy pamiętać, że np. obrażenie wg kodu 4 nie ma takiego samego znaczenia jak dwa obrażenia wg kodu 2.

W komunikacji samochodowej, gdzie wypadki występują znacznie częściej, można sporządzić odpowiednie statystyki, aby określić najgroźniejsze części pojazdu dla pasażera, jednak ich wyników nie można porównać z wypadkami w pojazdach szynowych ani ekstrapolować ze względu na różne wyposażenie samochodów ciężarowych i pociągów.

Klasyfikacja sił powodujących urazy głowy i szyi pasażera

W wyniku przeprowadzonych prac studialnych, dotyczących mechanizmów powodujących obrażenia głowy oraz szyi pasażerów pojazdów szynowych, przyjęto jako zasadnicze dwa rodzaje sił występujących podczas zderzenia pojazdów szynowych:

- **siły przylegania (niem. Berührungskräfte):** siły podczas zderzeń pojazdów szynowych zależne od przyspieszenia; pojawiają się wtedy, gdy oparta głowa podczas zderzenia pasażera uderza o przedmiot i skutek tego podnosi się lub jest wprawiona w ruch; skutek działania tych sił

powstają np. pęknięcia czaszki, stłuczenia i najczęściej krwiaki, ale nie ma żadnych rozległych i rozproszonych uszkodzeń mózgu

- **siły bezwładności (niem. Beharrungskräfte):** siły występują w przypadku gwałtownego przyspieszenia lub opóźnienia głowy, wskutek czego niekonieczny jest styk z przedmiotem, aby wywołać obrażenia; ważna jest identyfikacja rodzaju przyspieszenia, ponieważ wstrząsy mózgu mogą powstać tylko podczas przyspieszenia działającego na głowę i skierowanego pod kątem, natomiast liniowe przyspieszenia mogą spowodować lokalne urazy jak np. stłuczenia karku oraz krwiaki na głowie i otaczającej go skórze.

Siły powodujące urazy czaszki pasażera przy uderzeniach sztywnych (nietłumionych) oraz tłumionych są przedstawione w tabeli 3. Są to wyniki badań laboratoryjnych na małej liczbie próbek, przeprowadzone dla celów informacyjnych.

Jak wynika z tabeli 3 przy sztywnym, nietłumionym uderzeniu na kość czołową średnia siła wywołująca uraz znajduje się na poziomie 6 kN, przy czym powierzchnie uderzenia poniżej 5 cm² mogą w tym przypadku wywołać uszkodzenie czaszki już poniżej tej wartości. Znaczną rolę w tym przypadku pełni wykładzina tłumiąca, która znacznie podnosi średnią wartość powodującą uraz tej części głowy (o przynajmniej 22%). Uderzenia skierowane w bok głowy pasażera (kość ciemieniowa/ kość skroniowa) są bardziej dotkliwe w skutkach, zwłaszcza z przedmiotami o małej średnicy, gdzie średnia siła wynosi najwyżej 4 kN.

W przypadku płaskich powierzchni boczna strona głowy (kość skroniowa) wykazuje się podobną odpornością na uderzenia jak kość czołowa. Wyniki badań przedstawione w tabeli 3 stanowią wytyczne do projektowania urządzeń wewnętrznych w pojeździe samochodowym oraz w pojeździe szynowym, biorąc pod uwagę kryterium „bezpieczeństwa pasywnego” pasażera przed skutkami zderzeń.

Siły przylegania powodujące urazy czaszki pasażera podczas zderzenia pojazdów [25]

Tabela 3

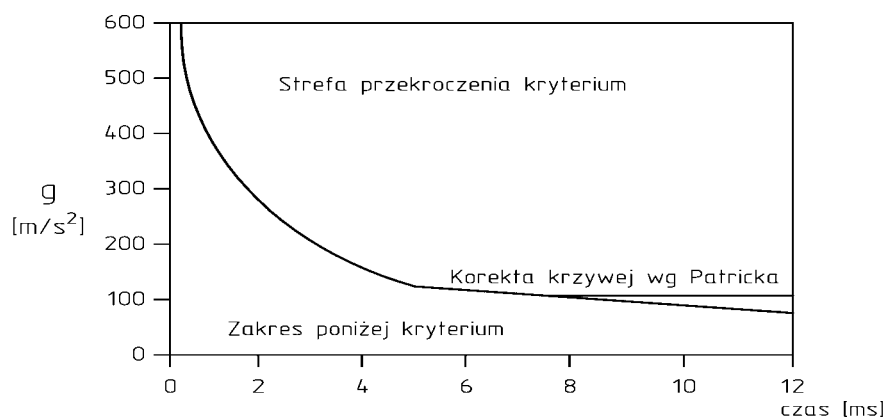
L.p.	Rodzaj uderzanej powierzchni/ uderzenia	Siła przylegania wywołująca złamanie [N]		Liczba próbek
		Wartość średnia	Przedział wartości	
Sztywne (nietłumione) uderzenia				
Kość czołowa				
1.	Powierzchnia płaska	6360	3910÷11790	12
2.	Powierzchnia płaska	6400	5420÷7870	6
3.	Powierzchnia wzdłużna cylindryczna:			
a	Ø 50 mm w kierunku poprzecznym	5600	4220÷7340	7
b	Ø 50 mm sagitalna	7120	4180÷8900	5
c	Ø 15,8 mm w kierunku poprzecznym	5470	3110÷7700	5
d	Kula o średnicy Ø 406 mm	5250	3690÷6810	5

4.	Płaska powierzchnia o małym polu:			
a	Średnica \varnothing 29 mm	5030	3770÷7120	5
b	Średnica \varnothing 29 mm	6180	4360÷8850	5
c	Średnica \varnothing 29 mm	5830	4140÷9880	7
d	Średnica \varnothing 15,5 mm	7610	4090÷9790	5
e	Średnica \varnothing 10,9 mm	4580	2090÷8900	5
5.	Wypukła powierzchnia o małym polu wynikającym ze średnicy \varnothing 17 mm	4450	2760÷8100	6
Kość ciemieniowa/ kość skroniowa				
6.	Płaska powierzchnia	5070	3430÷7830	13
7.	Płaska powierzchnia	8500	4670÷14590	7
8.	Płaska powierzchnia o małym polu:			
a	Średnica \varnothing 29 mm	3760	2450÷5920	7
b	Średnica \varnothing 29 mm	3120	1340÷5920	8
c	Średnica \varnothing 15,5 mm	5740	2220÷9790	10
d	Średnica \varnothing 10,9 mm	3470	620÷6670	10
9.	Wypukła powierzchnia o małym polu wynikającym ze średnicy \varnothing 17 mm	3410	1780÷4890	7
Kość potyliczna				
10.	Wypukła powierzchnia o małym polu wynikającym ze średnicy \varnothing 17 mm	6410	5120÷9560	5
Uderzenia tłumione				
Kość czołowa				
11.	Powierzchnia pokryta wykładziną o właściwościach tłumiących:			
a	Powierzchnia płaska	11 260	5340÷15100	7
b	Powierzchnia płaska o małym polu odp. średnicy \varnothing 25 mm	7340	4890÷8720	6

3. Kryteria biomechaniczne przed skutkami zderzeń

3.1. Kryteria dotyczące uszkodzenia mózgu i obrażeń

Do oceny stłuczeń głowy, jako skutku działań czysto liniowych przyspieszeń, zaproponowano najpierw krzywą tolerancji, przedstawioną na rys.3 [20].



Rys.3. Krzywa przyspieszeń liniowych działających na głowę pasażera

Analizując krzywą przedstawioną na rys.3 można stwierdzić, że **uraz głowy jest zależny od wielkości przyspieszenia** działającego w kierunku przód-tył, wywołanego uderzeniem w kość czołową i mierzonego w rejonie kości potylicznej (sięgającego nawet wielkości 600 g (5886 m/s²)) oraz czasu jego działania wyrażonego w milisekundach (max. 12 ms). Krzywa ta jest znana jako *Wayne State University Tolerance Curve* (w skrócie *WSTC*) [20] i była przez długi czas stosowana do oceny niebezpieczeństwa powstania urazów głowy, pomimo rozlicznych braków, do których zalicza się:

- stosowanie różnych metod empirycznych podczas badań, służących do ustalenia danych tzn. przy dużych przyspieszeniach badań dokonywano na zwierzętach, natomiast przy małych przyspieszeniach krzywa powstała w wyniku badań na ochotnikach, przy czym ich głowa była unieruchomiona.
- powstały wątpliwości, jak wielkie przyspieszenie może działać na głowę pasażera w przeciągu dłuższego czasu; w wyniku przeprowadzonej korekty asymptota krzywej WSTC została zwiększona z 42g (412 m/s²) na 80g (784.8 m/s²).

Kolejnym kryterium, które zostało wprowadzone w amerykańskiej normie jest tzw. *Head Injury Criterion* (*HIC*), które wyraża zależność wg [1]:

$$HIC = \left[(t_2 - t_1) \left\{ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right\}^{2.5} \right] < 1000 \quad (8)$$

gdzie:

t_1 i t_2 - odpowiednio czas rozpoczęcia i końca przedziału czasowego wyrażony w sekundach, w stosunku do którego odnosi się wskaźnik HIC

a- przyspieszenie, wyrażone jako krotność przyspieszenia ziemskiego g, działające na punkt ciężkości głowy pasażera (wg rys.3).

Wskaźnik HIC jest stosowany do wszystkich biomechanicznych kryteriów oceny a mianowicie:

- określenia tolerancji dla ludzkiego ciała lub przeprowadzenia badań wypadków ze zwłokami ludzkimi
- zastosowania manekinów do symulacji wypadków na poślizg z dużym opóźnieniem hamowania, przeprowadzenia badań z obiektami materialnymi wyposażonymi w materiały o własnościach tłumiących względnie sprawdzenie wszystkich systemów, które zwiększają pasywne bezpieczeństwo pojazdu szynowego

- numerycznego określenia biomechanicznego kryterium na podstawie liniowego przyspieszenia, działającego na środek ciężkości głowy.

Ponieważ wskaźnik HIC wywodzi się z kontrowersyjnej krzywej WSTC, nie można było udzielić mu powszechnej akceptacji do uniwersalnego zastosowania. Jednym z powodów było nieuwzględnienie przyspieszenia obrotowego, którego występowanie obowiązuje dla większości kryteriów. Pomimo, że obydwa rodzaje przyspieszeń nie powodują tych samych rodzajów obrażeń, wszystkie ich mechanizmy można było sprowadzić do wartości liniowego przyspieszenia. Wahania wartości wskaźnika HIC sprowadzają się nie tylko do różnic pomiędzy przypadkami indywidualnymi, ale również do rodzaju i sposobu, w których odbywają się wypadki, co obowiązuje zwłaszcza przy doświadczeniach z manekinami. Oprócz tego zwrócono uwagę na to, że pomiędzy wartościami wskaźnika HIC i skali AIS nie występuje zamienność, co było kolejnym argumentem przeciwko jego zastosowaniu. Kontrowersje wzbudziło zastosowanie kryterium (progu) bezpieczeństwa na poziomie HIC=1000 lub HIC=1500. Zwrócono uwagę na to, że przy zastosowaniu HIC=1000 jest zagwarantowana ochrona głowy pasażera przy sztywnych uderzeniach o krótkotrwałym działaniu, podczas gdy próg o wartości 1500 stanowi dobrą ochronę głowy przy bezpośrednim czołowym lub bocznym kontakcie jak również przy rekonstrukcjach wypadków pasażerów z zapiętymi pasami. Amerykańska norma SAE J885 [20] zaleca próg o wartości 1000, który wykorzystuje wielu badaczy. Trudno nie zgodzić się ze stwierdzeniem, że o ile nie ma bardziej zadawalającego kryterium o uniwersalnym znaczeniu, wskaźnik HIC może być zastosowany jako podstawa do wzajemnych porównań rozwiązań. Reasumując, za pomocą wskaźnika HIC można ocenić, czy występuje niebezpieczeństwo powstania obrażeń czy nie, ale nie dostarcza on stopniowanego oszacowania tego niebezpieczeństwa, co było powodem poszukiwania następnych, doskonalszych kryteriów.

Inne kryteria wynikały z przyjęcia modelu w kształcie masy jako bryły sztywnej, elementów sprężystych oraz tłumiących.

Do innych kryteriów zalicza się:

- Wskaźnik Tolerancji JTI (ang. „ J- Tolerances Index”)
- Przerobiony Model Mózgu RBM (ang. „Revised Brain Model”)
- Wskaźnik Rzeczywistego Odształcenia EDI (ang. „Effective Displacement Index”)
- Wskaźnik Przeciętnego Odształcenia MSC (ang. „Mean Strain Criterion”).

Ostatnie kryterium jest jedynym, które nie ma żadnego powiązania z krzywą WSTC. Kryterium przeciętnego odkształcenia MSC jest jedynym liniowym kryterium, które powinno być brane pod uwagę przy analizach wypadków, ponieważ powstało jako wynik rozlicznych badań przeprowadzonych na głowach pasażerów.

Rozwój kryteriów nie został zahamowany wskutek postępu dalszych badań w tym zakresie. Przykładem tego jest opracowanie przez zespół badawczy R.L. Stalnakera kryterium dla powstania urazów głowy, które polega na przepływie energii (ang. „Translational Energy Criterion”-TEC) [10]. Za pomocą „metody energetycznej” można przewidzieć powstanie zarówno stłuczeń jak również pęknięć czaszki. Jak wynika z [25], obecny stan wiedzy w tym zakresie nie pozwala na jednoznaczne stwierdzenie, które kryterium należy stosować oraz które ma charakter uniwersalny.

Porównując wszystkie kryteria nasuwają się następujące spostrzeżenia:

- kryterium wg wskaźnika HIC jest jedynym, które jest wynikiem rozlicznych badań i za pomocą którego można ustalić granice jego zastosowania
- w celu ustalenia wymagań dla głowy przy bocznym uderzeniu można zastosować kryteria HIC, MSC i TEC przy czołowym uderzeniu.

Zespół badawczy Stalnakera zaproponował próg dla przyspieszenia wynoszącego 20g (196.2 m/s²) w czasie działania wynoszącym 20 milisekund [10]. Po szeregu badaniach eksperymentalnych Huelke i Melwin doszli do wniosku, że ciężkie obrażenia występują przy prędkości zderzenia wynoszącej 33 km/h (9,2 m/s) [2]. W wyniku badań za pomocą miękkiego uderzenia i występujących przy tym krwotoków na bocznej powierzchni głowy osiągnięto wartości HIC od 1300 do 5200 przy wartości przeciętej wynoszącej 2900 HIC. Przy wszystkich wymienionych kryteriach, przede wszystkim z modelami skierowanymi w jedną stronę, przyspieszenie obrotowe pozostaje niewzględzone, pomimo przyjęcia założenia, że może ono wywoływać zranienia bez kontaktu z jakąkolwiek powierzchnią. Również zastosowane przyspieszenie liniowe może być zakwestionowane, ponieważ ogranicza się ono do środka masy głowy, natomiast w rzeczywistości kierunki uderzenia nie są centryczne i wywołują obrót głowy, co jest związane z występowaniem przyspieszenia obrotowego. Można więc przyjąć założenie, że modele przedstawiają tylko część uwzględnionych mechanizmów powstawania obrażeń [1].

3.2. Kryteria dotyczące uszkodzeń kości twarzy i szyi pasażera

Do najważniejszych kości twarzy należą kości policzkowe i szczęki. Kości te mogą być obciążone oddzielnie lub razem. Z przeprowadzonych badań wynika, że szkielet twarzy stawia bardzo duży opór, jeśli uderza on na miękką powierzchnię. Przy prędkościach głowy wynoszących od 14,4 km/h (4 m/s) do 64,8 km/h (18 m/s) nie stwierdzono ani jednego pęknięcia, przy czym wartości przyspieszeń znajdowały się poniżej 60g (588.6 m/s²). W tabeli 4 podano dane dotyczące wytrzymałości kości twarzy pasażera.

Wytrzymałość kości twarzy pasażera ustalona na drodze eksperymentalnej [25]

Tabela 4

L.p.	Rodzaj kości	Sposób uderzenia	Siła uderzenia w [N]		Wielkość próby losowej
			wartość średnia	zakres siły	
1.	Kość policzkowa	a, b	1717	614÷3470	19
2.	Kość policzkowa	a, c	1665	925÷2850	10
3.	Kość policzkowa	d	1259	845÷1665	5
4.	Kość policzkowa	e	2297	1600÷3360	7
5.	Kość jarzmowa	c	1535	925÷2110	17
6.	Szczeka górna	c	1148	623÷1980	13
7.	Szczeka dolna	b	f	778÷934	f
8.	Żuchwa	b	f	1558÷1780g	f
9.	Żuchwa	b	f	1290÷1445g	f
10.	Żuchwa	c	3100	890÷4110	9
11.	Żuchwa	h	1918	818÷3405	9

a- uderzenie kości szczękowej z bliskiej odległości

b- sztywne, płaskie ciało o średnicy Ø 29 mm z wykładziną gąbkową o grubości 5 mm

c- jak w b, przy innej wykładzinie o grubości wynoszącej 5 mm

d- odbojnik o średnicy Ø 29 mm z warstwą tłumiącą

e- odbojnik o średnicy Ø 65 mm z warstwą tłumiącą

f- bliżej nieopisany

g- dolny zakres sił, przy którym nastąpi pęknięcie

h- sztywny, płaski odbojnik o wymiarach 25×100 mm z wykładziną o grubości 5 mm

Analizując bezpośrednio uderzenia na szyję pasażera i zakres siły, jaki jest ona w stanie przenieść okazuje się, że przednia część szyi jest tak miękka, iż po przyjęciu uderzenia droga powietrza do płuc może być łatwo zablokowana. W wyniku przeprowadzonych prób doświadczalnych okazało się, że występują sporadyczne zjawiska pęknięć tarczycy przy działaniu sił w przedziale 890 do 1100 N i krtani 770 do 1000 N [2]. Przy oddzielnie wykonanych próbach na chrząstkach obydwu organów ustalono średnią siłę powodującą pęknięcia na poziomie 180 N dla chrząstki tarczycy oraz 250 N dla krtani. Dla obydwu chrząstek, które przy 50% zgnieceniu były obciążone za pomocą urządzenia udarowego o średnicy \varnothing 38 mm (pole 11 cm²), zarejestrowano siłę wynoszącą 490 N. Wprawdzie ustalona siła nie była daleka od pełnego ściśnięcia krtani, ale otrzymano wyniki, które odbiegały znacznie od wyników innych doświadczeń. Próby przeprowadzone z urządzeniem udarowym o powierzchni 6,5 cm² i siłą 400 do 450 N prowadziły do rzadkich pęknięć ww. części ciała.

3.3. Kryteria dotyczące klatki piersiowej i brzucha

Pomiary przeprowadza się, przyjmując jako kryterium wciśnięcie klatki piersiowej wyrażone w mm lub wyrażone w procentach stłuczenia, biorąc za bazę grubość klatki piersiowej przed przeprowadzeniem badań. Najczęstszym „kryterium Huelkego” przyjmowanym do analiz jest wielkość wciśnięcia wynosząca maksymalnie 44 mm, aby uniknąć złamania żeber. Natomiast przy wciśnięciu wynoszącym 64 do 76 mm należy liczyć się z poważnymi obrażeniami zakwalifikowanymi jako 3-ciego stopnia w skali AIS [2]. Innym kryterium wystąpienia wewnętrznych obrażeń przyjętym przez Verriesta i Chapona jak również Viano i Lau jest stosunek wciśnięcia do początkowej grubości klatki piersiowej wynoszący maksimum 0,4 [3, 11,12,13,14 i 15]. Doświadczenia przeprowadzone z ochotnikami pokazały, że wciśnięcie klatki o 20 % jest niegroźne i jest całkowicie odwracalne, natomiast podczas badań na zwłokach ludzkich przy 40 % wciśnięciu stwierdzono bardzo liczne złamania żeber klatki piersiowej. W następstwie tego zaproponowano górną granicę wciśnięcia klatki piersiowej wynoszącą 35%. (ang. „maximal chest compression”).

Podczas uderzenia czołowego w klatkę piersiową, zamiast głębokości wciśnięcia można mierzyć też przyspieszenie w rejonie kręgosłupa. Jako kryterium zaleca się maksymalne przyspieszenie wynoszące 60g (588,6 m/s²) w czasie 3 ms. Powyższe kryterium można skonfrontować z innymi danymi literaturowymi, wg których w przypadku akrobaty skaczącego z wysokości 17,4 m na materac przyspieszenie działające na kręgosłup wynosi 46 g (451 m/s²), natomiast kiedy upada on na brzuch, zmierzono na mostku przyspieszenie wynoszące 380 g (3727 m/s²) i na kręgosłupie 68 g (667 m/s²). Przy badaniu serii uderzeń na

klatkę piersiową wykryto, że maksymalne przyspieszenie kręgosłupa na wysokości klatki piersiowej jest gorszym kryterium rozstrzygającym o ewentualnym występowaniu obrażeń i powinno ono być zastąpione przez maksymalne wciśnięcie klatki piersiowej.

3.4. Ocena kryteriów biomechanicznych

Kryteria biomechaniczne dla klatki piersiowej prowadzą się do:

- kryterium VC (ang. „Viscous Criterion”) opracowane na bazie energii pochłoniętej przez klatkę piersiową, uwzględnia prędkość jej deformacji; wychodzi się tutaj z założenia, że przy prędkości odkształcenia mniejszej niż 3 m/s (10,8 km/h) można zastosować kryterium maksymalnego wciśnięcia. Ze względu na wiskotyczność klatki piersiowej prędkość odkształcenia ma duży wpływ na zakres wciśnięcia i tym samym na niebezpieczeństwo zranienia miękkich tkanek ciała. Kryterium VC można wyrazić za pomocą wzoru:

$$VC = \dot{y} \cdot \frac{y}{D} \quad (9)$$

gdzie:

$$V = \dot{y} \quad \text{i} \quad C = \frac{y}{D} \quad (10)$$

oraz:

D-grubość klatki piersiowej przed zderzeniem
y- chwilowe odkształcenie (wciśnięcie) klatki piersiowej

\dot{y} -chwilowa prędkość deformacji klatki piersiowej.

- kryterium TTI (ang. „Thoracic Trauma Index”) opracowane na statystycznych badaniach 49 wypadków śmiertelnych; definiuje się je za pomocą wzoru:

$$TTI = 1,4A_e + \frac{0,5 \cdot (R_e + S_e)}{75} \cdot M_e \quad (11)$$

gdzie:

A_e-wiek (rocznik) pasażera

e- wskaźnik równoważny dla ofiar śmiertelnych i manekinów

M_e-masa pasażera [kg]

R_e- maksymalne efektywne przyspieszenie żebra [g]

S_e- maksymalne boczne przyspieszenie kręgosłupa [g].

Kryterium VC jest przeznaczone głównie do analizy wystąpienia ewentualnych obrażeń, wynikających z czołowego uderzenia w klatkę piersiową pasażera. Obydwa kryteria VC i TTI są stosowane do analiz skutków wypadków wynikających z bocznych uderzeń.

Kryteria biomechaniczne można stosować tylko do określonego zakresu ludzkiego ciała i w ogólnym przypadku tylko dla określonego rodzaju obrażeń. Ofiara wypadku cierpi jednak zwykle z powodu zróżnicowanych obrażeń doznanych podczas wypadku, które działając jednocześnie mogą się jeszcze bardziej pogłębiać. Nie można stosować tylko jednego kryterium dla jednej części ciała. O wiele bardziej należy się troszczyć o całkowitą ochronę pasażera. Na przykładzie transportu samochodowego okazuje się, że wartości wskaźnika HIC można zmniejszyć, jeśli przyjmie się, że pasażer posiada zapięty pas w rejonie podbrzusza. W tym przypadku jednak bardziej obciążone są kości uda. W przypadku komunikacji kolejowej należy uwzględnić inne rozwiązania niż w komunikacji samochodowej, ponieważ pasażerowie nie posiadają pasów bezpieczeństwa. W tym przypadku nie trzeba uwzględniać sił wywieranych na podbrzusze ani też obciążeń na nogi. W rzeczywistości kinematyka podróży pociągu zmusza do tego, aby uwzględniać ochronę tych części ciała, które nie są obciążone w komunikacji samochodowej.

Dla celów informacyjnych kryteria biomechaniczne obowiązujące w transporcie samochodowym przedstawiono w tabeli 5 [25].

Zestawienie kryteriów biomechanicznych dla poszczególnych części ciała pasażera w komunikacji samochodowej
Tabela 5

L.p.	Część ciała	Kryterium bezpieczeństwa	Wartość
1.	Głowa	Wartość wskaźnika GAMBIT	1,0
2.	Szyja	Moment zginający	370, 0 Nm
3.	Klatka piersiowa	Nacisk wywołujący wciśnięcie	40 mm
4.	Ramiona	Siła kontaktu na rękach	3,8 kN
5.	Podbrzusze	Przyspieszenie miednicy ($\alpha > 20^\circ$)	13,0 g
6.	Podbrzusze	Przyspieszenie miednicy ($\alpha \leq 20^\circ$)	80,0 g
7.	Nogi	Siła kontaktu działająca na nogi	10,0 kN

4. Wytyczne do konstruowania pojazdów szynowych w komunikacji osobowej, zabezpieczające pasażera przed obrażeniami w przypadku zderzeń

W celu sformułowania wytycznych do konstruowania pojazdów szynowych w komunikacji osobowej, które mają zagwarantować bezpieczeństwo pasażera podczas zderzeń, przeprowadzono obliczenia symulacyjne dla 24 przypadków różnych konfiguracji zderzeń [25]. W oparciu o wyniki obliczeń sformułowano

następujące **wymagania wytrzymałościowe** dla prędkości zderzenia 54 km/h (15 m/s):

- zderzaki powinny być przystosowane do przeniesienia siły wynoszącej 1500 kN, co odpowiada obecnym wymaganiom technicznym, stawianym pojazdom i zarazem umożliwia maksymalne zastosowanie zróżnicowania sztywności poszczególnych elementów pociągu; powyżej siły 1500 kN mogą wystąpić pęknięcia elementów mocowania zderzaków, jednakże bez wystąpienia uszkodzeń końców pudła pojazdu
- należy zastosować wymienne elementy pochłaniające energię z odpowiednią długością deformacji, zainstalowane za zderzakami, do przeniesienia siły do 1750 kN tak, aby umożliwić zadziałanie urządzeń zapobiegających uniesieniu się pojazdu; powyżej 1750 kN następuje zgniot elementów pochłaniających (ang. „crashelemente”)
- strefy pojazdu, w których są dopuszczalne pęknięcia (niem. „Sollbruchbereiche”) powinny być zaprojektowane na bezpieczne przeniesienie siły wynoszącej 2000 kN; powyżej tej siły następuje zgniot elementów poprzez plastyczne odkształcenie końców pudła wagonu
- strefy przedziałów dla podróży należy projektować tak, aby mogły przenieść siłę 4000 kN.

Ww. wymagania nie powinny powodować rozwoju pojazdów o dużej masie własnej. Ponadto stwierdzono, że jeśli prędkość zderzenia przekracza 30 km/h (8.33 m/s²), wówczas wzrasta niebezpieczeństwo utraty zdrowia i życia przez pasażerów co najmniej o 50% (przy stopniu AIS >3). Przy projektowaniu pudeł wagonów osobowych zaleca się, aby podczas zderzenia został zrealizowany „ich stopniowy zgniot”, co można uzyskać przez przejście z jednej strefy do drugiej przy zastosowaniu współczynnika bezpieczeństwa wynoszącego 1,5 do 2. Jeśli przyjmie się, że wytrzymałość czołownicy ostoji wagonu jest ograniczona do 2000 kN, to wówczas strefa dopuszczalnych pęknięć występuje w zakresie 3000 do 4000 kN, a następne przedziały dla podróży podlegają trwałym deformacjom przy działaniu sił 4500 do 6000 kN.

W przypadku zderzenia pojazdów o podobnej konstrukcji na prostym odcinku toru kolejowego:

- **przy prędkościach nabiegania poniżej 14,4 km/h (4,0 m/s):**
 - ♦ przy prędkości mniejszej niż 14,4 km/h energia zderzenia musi być pochłonięta w ramach przewidzianego skoku zderzaków lub sprzęgu samoczynnego

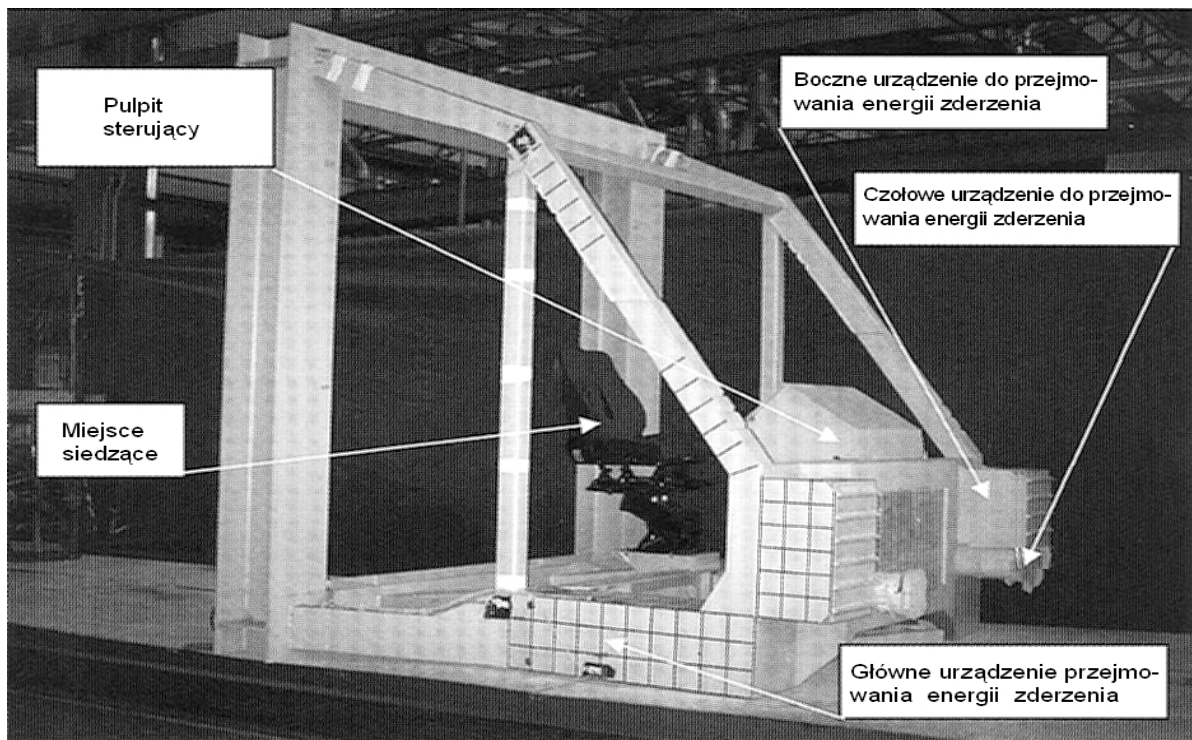
- ◆ przy prędkości mniejszej niż 7,2 km/h (2,0 m/s) maksymalne przyspieszenie wzdłużne w pudle wagonu pojazdu nie może przekroczyć 2g (19,62 m/s²)
- ◆ przy prędkości zawierającej się w przedziale 7,2 do 14,4 km/h maksymalne przyspieszenie wzdłużne w pudle wagonu pojazdu nie może przekroczyć 3g (29,43 m/s²)
- ◆ poniżej prędkości 14,4 km/h żaden z pasażerów nie może doznać jakichkolwiek obrażeń.
- **przy prędkościach nabiegania większych od 14,4 km/h (4.0 m/s) i mniejszych od 28,8 km/h (8m/s):**
 - ◆ przy prędkości większej niż 14,4 km/h energia zderzenia nie jest już pochłaniana przez sprzęg
 - ◆ przy prędkościach większych niż 14,4 km/h i mniejszych niż 28,8 km/h musi być uniemożliwione podnoszenie się pojazdu przez zastosowanie odpowiednich urządzeń zabezpieczających pojazd przed „unoszeniem się”; funkcja oraz wydajność tych urządzeń musi być zachowana przez cały czas zmiany wysokości pojazdu szynowego podczas eksploatacji, spowodowanej między innymi przemieszczeniami dynamicznymi
 - ◆ przy prędkościach, które nie przekraczają 28,8 km/h energia zderzenia musi być pochłonięta przez urządzenie pochłaniająco-zderzne, które można łatwo wymienić; maksymalne przyspieszenie wzdłużne nie może przekroczyć 5g (49,05 m/s²)
- **przy prędkościach nabiegania większych od 28,8 km/h (8 m/s) i mniejszych od 65 km/h (18 m/s):**
 - ◆ przy prędkości mniejszej niż 65 km/h energia zderzenia musi być przejęta łącznie przez zderzaki, elementy zderzno-pochłaniające jak również stopniowe odkształcenie pudła wagonu; odkształcenie pudła wagonu nie może przekroczyć 1000 mm

- ◆ dla maszynisty musi być przewidziana bezpieczna przestrzeń, gwarantująca przeżycie.

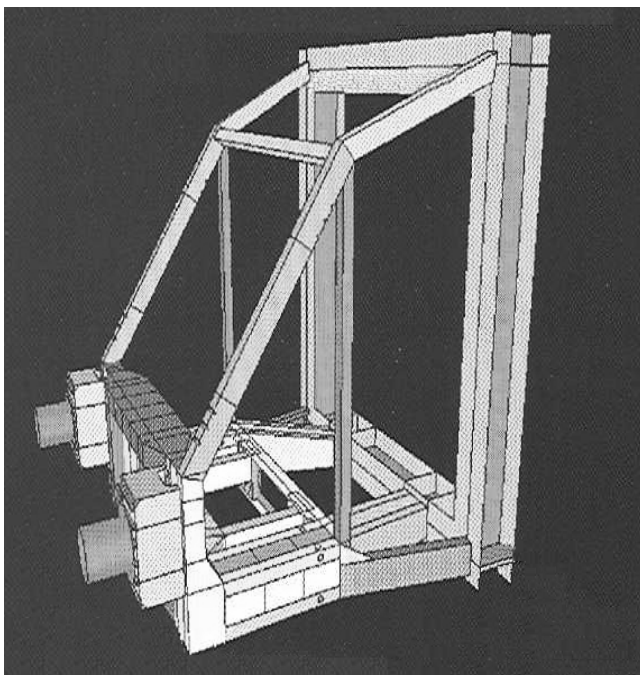
Przy prędkości większej od 65 km/h (18 m/s) występuje katastrofa kolejowa i nie podaje się wytycznych. Podczas konstrukcji wewnętrznego wyposażenia pojazdu należy przestrzegać następujących zasad:

- pokrycie wszystkich metalowych powierzchni za pomocą elastycznej wykładziny
- bardzo często stosowane ściany szklane muszą być poddane kontrolnym testom z uwagi na bezpieczeństwo dla pasażerów podczas zderzeń
- nie należy stosować przedmiotów o ostrych krawędziach
- w przypadku przedziałów bagażowych należy stosować ścianki działowe, aby uniemożliwić upadek bagażu na pasażera
- wykonać szczególną kontrolę pod kątem sprawdzenia, czy składane stoliki stwarzają niebezpieczeństwo dla podbrzusza pasażera.

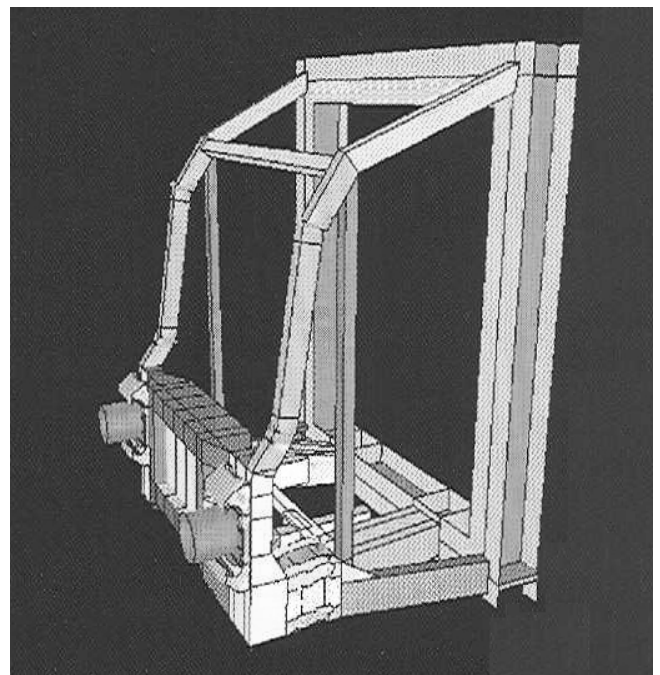
Ważnym elementem wyposażenia wewnętrznego jest siedzenie pasażera, które zgodnie z kartą UIC 567 [18] musi wytrzymać siłę wzdłużną wynoszącą 1500 N lub przyspieszenie 2g (19,62 m/s²) przy masie pasażera 75 kg. W tym przypadku wychodzi się z założenia, że całą masę podróżnego przenosi oparcie siedzenia, co nie ma całkowitego potwierdzenia w rzeczywistości. Jak wynika z analiz doświadczalnych, na pasażera może działać składowa siła bezwładności na wysokości 2/3 oparcia, w kierunku wzdłużnym i osiągająca maksymalną wartość 2250 N, co odpowiada maksymalnemu opóźnieniu wynoszącemu 3g (29,43 m/s²). Ww. wartość siły wynika z równania równowagi momentów sił względem dolnej krawędzi oparcia siedzenia. Ten przypadek występuje wtedy, gdy miejsce siedzące jest obrócone w kierunku przeciwnym do kierunku jazdy. Jak wynika z obecnego stanu obowiązujących dokumentów, przypadek ten nie został uwzględniony w przepisach jako obligatoryjny. Przykłady nowoczesnych konstrukcji tramwajowych wyposażonych w elementy pochłaniająco-zderzne oraz w urządzenia zabezpieczające pojazd przed „wspinaniem się” są przedstawione na rys. 4 i 5 [16].



Rys.4. Nowoczesne rozwiązanie konstrukcji kabiny tramwajowej z wewnętrznymi oraz zewnętrznymi „strefami deformacji” w przypadku zderzeń (zaprojektowanej przez Bombardier Transportation Portugal, producent: Ansaldo Breda Pistola)



a



b

Rys.5. Konstrukcja kabiny tramwajowej firmy Alstom (La Rochelle)
 a) widok konstrukcji przed zderzeniem
 b) widok konstrukcji po zderzeniu (kabina częściowo odkształcona, strefa drzwi niezdeformowana)

5. Zakończenie

Kryteria oceny przy zderzeniach dla pojazdów szynowych komunikacji osobowej mają odmienny charakter niż dla wagonów towarowych [4,5 i 6] i wynikają ze specyfiki, związanej z zapewnieniem bezpieczeństwa dla pasażerów i personelu obsługującego przed obrażeniami w trakcie zderzeń. Ważną rolę pełnią tutaj kryteria biomechaniczne, za pomocą których można dokonać kwalifikacji urządzeń wewnętrznych, przy uwzględnieniu bezpieczeństwa podróżnych. Przyjmuje się założenie, że teoretycznie da się oszacować, jak ciężkie w skutkach jest zderzenie i jak działa na ciało ludzkie. Rozpatrując problematykę zderzeń pojazdów szynowych bezspornym jest fakt, że najcięższym zderzeniem jest zderzenie czołowe, które można podzielić na trzy kategorie:

- czyste zderzenie czołowe
- czołowe zderzenie z „unoszeniem się” pojazdu
- czołowe zderzenie połączone z niestabilnością pociągu i wykolejeniem.

Pierwsza kategoria zderzeń należy do tych, które konstruktor może najlepiej opanować. W tym przypadku chodzi o to, aby wykorzystać wszystkie możliwe strefy „odkształcalne” pojazdu, w celu pochłonięcia energii zderzenia bez występowania odkształceń przedziałów dla podróżnych. Koncepcja stref pojazdu przeznaczonych do zniszczenia umożliwia lepsze zabezpieczenie wagonu przed skutkami zderzeń.

Drugą kategorię zderzeń określa się mianem katastrofy kolejowej i należy na ścianach czołowych pojazdu przewidzieć zabudowę urządzeń zapobiegających „unoszeniu się” wagonu.

Trzecia kategoria zderzeń występuje przy wysokich prędkościach i stanowi poważną katastrofę kolejową. Jeśli pojazd ulega wykolejeniu w wyniku zderzenia, to istnieje bardzo duże prawdopodobieństwo ponownego zderzenia z elementem budowy stałej infrastruktury kolejowej np. słupem trakcyjnym (boczne zderzenie pojazdu szynowego).

Istotną zaletą pojazdu szynowego w stosunku do samochodu jest to, że pojazd szynowy może przejąć znacznie większą energię zderzenia, wykazując odkształcenia trwałe. Z tego powodu podróżni w samochodzie są zobowiązani do korzystania z pasów bezpieczeństwa, aby zwiększyć szanse przeżycia w wyniku zderzenia. Podróżni w pojazdach szynowych są narażeni na umiarkowane przyspieszenia, które nie powodują konieczności stosowania pasów bezpieczeństwa.

Literatura

- [1] Balas M., Ramet M.: *Les mécanismes des liaisons cérébrales par choc et les problèmes de leur évaluation. Rapport INRETS No 79 1988.*
- [2] Huelke D.F., Melvin J.W.: *Anatomy injury frequency, biomechanics and human tolerance. SAE paper nr 800098, 1980.*
- [3] Lau I.V., Viano I.V.: *The viscous criterion. Bases and applications of an injury severity index for soft tissues. SAE Paper. Proceedings of the 30 th Stapp Car Crash Conference. San Diego, 1986.*
- [4] Nowicki J., Sobaś M.: *Kryteria oceny zabezpieczenia pojazdów szynowych przed skutkami zderzeń. Pojazdy Szynowe nr 3/2006.*
- [5] Nowicki J., Sobaś M.: *Wymagania stawiane elementom pochłaniającym energię zderzenia w wagonach-cysternach. Pojazdy Szynowe nr 4/2006.*
- [6] Nowicki J., Sobaś M.: *Przedsięwzięcia materiałowe i konstrukcyjne zwiększające bezpieczeństwo pojazdów szynowych przed skutkami zderzeń. Pojazdy Szynowe nr 1/2007.*
- [7] Scholes A.: *Railway passenger vehicle design loads and structural crashworthiness. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1987.*
- [8] Soltis S.J., Olcott J.W.: *The development of dynamic performance standards for general aviation aircraft seats. SAE Paper. Crash dynamics of general aviation aircraft. 1985.*
- [9] Stalnaker R.L., Lin A.C., Guenther D.A.: *The Application of the New Mean Strain Criterion. IRCOBI /AAAM Conf. on the Biomechanics of Impacts. Göteborg, Sweden 1985.*
- [10] Stalnaker R.L., Low T.C., Lin A.C.: *Translation energy criteria and its correlation with head injury in the sub-human primate. IRCOBI Conf. on the Biomechanics of Impacts. Birmingham, United Kingdom, 1987.*
- [11] Verriest J., Chapon A.: *Validity of thoracic injury criteria based on the number of rib fractures. 10 th Experimental Safety Vehicle Conf. Oxford-England 1985.*
- [12] Viano D.C., Lau I.V.: *Role of impact velocity and chest compression in thoracic injury. Aviat. Space Enviro. Med. nr 54, 1985.*
- [13] Viano D.C., Lau I.V.: *Thoracic impact: a viscous tolerance criterion. 10 th Experimental Safety Vehicle Conf. Oxford-England 1985.*
- [14] Viano D.C.: *Limits and challenges of crash protection. Accident Anal. 1988.*
- [15] Wang J.T.: *Analytical studies of injury criteria for the thorax. Journal of Biomechanical Engineering Nr 111, 1985.*

- [16] Wolter W.: *Kollisionssichere Schienenfahrzeuge –Empfehlungen für Hersteller und Betreiber*. ZEV Rail. Glasers Annalen Nr. 128. Tagungsband Graz 2004.
- [17] Karta UIC 566: *Obciążenia pułk wagonów pasażerskich i ich części dobudowanych*. 3-cie wydanie z 1.01.1990 z uzupełnieniem z 1.07.1994
- [18] Karta UIC 567: *Postanowienia ogólne dla wagonów osobowych*. 2-gie wydanie z 11.2004.
- [19] Norma SAE J374: *Passenger car roof crush test procedure*. Styczeń 1980.
- [20] Norma SAE J885: *Human tolerance to impact conditions as related to motor vehicle design*. Lipiec 1986.
- [21] Norma SAE J 996: *Inverted vehicle drop test procedure*. Styczeń 1980.
- [22] pr EN 15 227: *Kolejnictwo. Wymagania odpornościowe na zderzenia nadwozi pojazdów szynowych. (Railway applications. Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies)*. Kwiecień 2005.
- [23] Raport ERRI B205/Rp.1 *Podstawowe zasady bezpieczeństwa przed skutkami zderzeń pojazdów szynowych*. Załącznik 1 do pisma B 205.97 z 5.12.1994. (*Leitende Grundsätze der Aufprallsicherheit von Eisenbahnfahrzeugen*). Utrecht, listopad 1994.
- [24] Raport ERRI B205/Rp.1 *Podstawowe zasady bezpieczeństwa przed skutkami zderzeń pojazdów szynowych*.(*Leitende Grundsätze der Aufprallsicherheit von Eisenbahnfahrzeugen*). Utrecht, luty 1995.
- [25] Raport ERRI B 106/Rp.20: *Wytrzymałość na zderzenia pułka wagonu osobowego. Oddziaływanie zderzeń zdeterminowanych wypadkiem na wagony osobowe. Zalecenia warunków technicznych dostawy. (Stossfestigkeit des Wagenkastens von Reisezugwagen. Auswirkungen unfallbedingter Stösse auf Untersuchung. Vorschläge für technische Lieferbedingungen)*. Utrecht 12/1993