

Wymagania stawiane elementom pochłaniającym energię zderzenia w wagonach-cysternach

W artykule przedstawiono wymagania dotyczące elementów pochłaniających energię w wagonach-cysternach wynikające z aktualnych przepisów międzynarodowych. Analiza wykazuje wzrost znaczenia bezpieczeństwa pasywnego przed skutkami zderzeń dla wagonów towarowych, zwłaszcza cystern przewożących ładunki niebezpieczne. Obowiązujące wymagania są kolejnym poważnym wyzwaniem dla producentów pojazdów szynowych, którzy muszą zagwarantować nowe rozwiązania konstrukcyjne pochłaniające energię zderzenia, nie zwiększając drastycznie ceny nowo produkowanego oraz modernizowanego taboru.

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

1. Wstęp

W projektowaniu i produkcji wagonów towarowych, ze względu na liczebność w poszczególnych typach oraz konieczność ich stosowania do ruchu międzynarodowego, uwzględniono daleko idącą standaryzację. Dlatego też szczególnie ten typ pojazdów wymaga od konstruktorów, technologów oraz użytkowników taboru szczególnej znajomości przepisów międzynarodowych zawartych w kartach UIC, raportach ORE/ERRI i normach europejskich EN.

Rozwiązania konstrukcyjne wagonów towarowych muszą umożliwić realizację przedsięwzięć sformułowanych przez raport ERRI B12/Rp.17 [18]:

- skoncentrowanie produkcji części zamiennych w możliwie dużych seriach i poprzez uniknięcie dużej ilości oprzyrządowania oraz osiągnięcie obniżenia kosztów produkcji
- przygotowanie części wagonów do wymiany między sobą
- ekonomicznej organizacji napraw i konserwacji wagonów towarowych przez zmniejszenie ilości typów konstrukcyjnych i części zamiennych.

Aspekt ekonomiczny sformułowany w ww. raporcie ERRI jest wciąż aktualny przy wzrastających wymaganiach dotyczących bezpieczeństwa pojazdów szynowych. Pojęcie bezpieczeństwa pojazdu szynowego podczas jego eksploatacji zostało w ostatnich latach bardzo rozszerzone, zwłaszcza w zakresie zderzeń [1]. Nakłada to na producenta obowiązek zabezpieczenia konstrukcji przed skutkami zderzeń nadzwyczajnych, czyli przy przekroczeniu prędkości nabiegania wynoszącej 12 km/h (uznanej jako normalną prędkość eksploatacyjną, która nie powinna spowodować uszkodzeń prawidłowo skonstruowanych wagonów).

Z praktyki eksploatacyjnej wynika jednak, że prędkość ta może być przekroczona nawet przy nabieganiach podczas rozrządu wagonów towarowych. Należy również brać pod uwagę skutki zderzeń z innymi pojazdami oraz przeszkodami, co w przypadku cystern przewożących ładunki niebezpieczne może mieć katastrofalne skutki dla środowiska naturalnego. Wynika stąd konieczność dodatkowych zabezpieczeń konstrukcyjnych przed skutkami zderzeń. Takimi elementami konstrukcyjnymi są przede wszystkim elementy zderzno-pochłaniające (niem. crashelemente).

2. Wymagania dla elementów zderzno-pochłaniających montowanych w wagonach-cysternach

2.1. Wymagania ogólne

Obecnie eksploatowane wagony- cysterny, pod względem dopuszczalnego nacisku zestawu kołowego na tor oraz maksymalnej prędkości, można podzielić na dwie grupy:

- wagony z dopuszczalnym naciskiem zestawu kołowego na tor 20 t; wagony te powinny posiadać możliwość osiągnięcia maksymalnej prędkości 100 km/h w stanie załadowanym
- wagony z dopuszczalnym naciskiem zestawu kołowego na tor 22,5 t; wagony te powinny posiadać możliwość osiągnięcia maksymalnej prędkości 100 km/h względnie 120 km/h, jeśli maksymalny nacisk zestawu kołowego na tor nie przekracza 20 t.

Czterosiowe wagony-cysterny powinny być wyposażone w standardowe układy biegowe zgodne z przepisami karty UIC 432 [4]. Jak wynika z praktyki wagony-cysterny są eksploatowane najczęściej w dwóch

stanach obciążenia: „próżny” oraz „ładowny” przy wykorzystaniu maksymalnej granicy ładowności. W tabeli 1 podano wybrane parametry konstrukcyjne nowoczesnych wagonów-cystern, eksploatowanych obecnie na sieci kolejowej DB AG i wyprodukowanych przez przemysł niemiecki w latach dziewięćdziesiątych XX wieku [16]. W tabeli 2 przedstawiono dopuszczalne ładowności tych wagonów-cystern dla różnych klas torów A, B, C i D wg karty UIC 700 [15].

Wybrane parametry konstrukcyjne wagonów-cystern wg [16]

L.p	Typ wagonu	Masa własna [kg]	Nacisk zestawu kołowego na szynę [t]	Baza wagonu [m]	Długość wagonu ze zderzakami [m]	Pojemność użytkowa wagonu [m ³]	Uwagi
1	1695.85	23 800	22.5	11.560	16.600	95	**)
2	8098.81	30 200	22.5	15.600	20.840	128	
3	5270.83	25 100	22.5	11.360	16.400	70	
4	4737.80	24 100	22.5	9.360	14.400	37	
5	5356.81	23 500	20	12.000	17.900	56	
6	*)	27 000	22.5	11.060	12.300	63	
7	7299.82	28 300	22.5	12.750	18.690	113	

*) wagon znany w Niemczech jako „mobile Fernwärme”

***) wagony cysterny są wyposażone w standardowe układy biegowe wymienione w karcie UIC 432 [4]

Zestawienie ładowności wagonów-cystern w zależności od prędkości wg [16]

L.p.	Typ wagonu	Ładowności dla poszczególnych wagonów cystern dla różnych klas toru [t], prędkość 90 km/h				Ładowności dla poszczególnych wagonów cystern dla różnych klas toru [t], prędkość 100 km/h			
		A	B	C	D	A	B	C	D
		Dopuszczalny nacisk zestawu kołowego na szynę [t]				Dopuszczalny nacisk zestawu kołowego na szynę [t]			
		16	18	20	22.5	16	18	20	22.5
1	1695.85	40.2	48.2	56.2	66.2	40.2	48.2	56.2	66.2
2	8098.81	33.8	41.8	49.8	59.8	33.8	41.8	49.8	59.8
3	5270.83	38.9	46.9	54.9	64.9	38.9	46.9	54.9	64.9
4	4737.80	39.9	47.9	55.9	65.9	39.9	47.9	55.9	65.9
5	5356.81	40.5	48.5	56.5	-	40.5	48.5	56.5	-
6	*)	37.0	45.0	53.0	63.0	37.0	45.0	53.0	63.0
7	7299.82	35.7	43.7	51.7	61.7	35.7	43.7	51.7	61.7

*) wagon znany w Niemczech jako „mobile Fernwärme”

Wartości wskaźnika obciążenia użytkowego do objętości użytkowej dla różnych typów wagonów-cystern wg [16]

L.p.	Typ wagonu	Pojemność użytkowa wagonu [m ³]	Maksymalna ładowność użytkowa [t] przy 90 km/h	Wskaźnik: obciążenie użytkowe do objętości użytkowej $\left[\frac{t}{m^3} \right]$	Maksymalna ładowność użytkowa [t] przy 100 km/h	Wskaźnik: obciążenie użytkowe do objętości użytkowej $\left[\frac{t}{m^3} \right]$	Uwagi
1	1695.85	95	66.2	0.69	56.2	0.59	
2	8098.81	128	59.8	0.46	49.8	0.38	
3	5270.83	70	64.9	0.92	54.9	0.78	
4	4737.80	37	65.9	1.78	55.9	1.51	**)
5	5356.81	56	56.5	1.00	56.5	1.00	
6	*)	63	63	1.00	63	1.00	
7	7299.82	113	61.7	0.54	61.7	0.54	

*) wagon znany w Niemczech jako „mobile Fernwärme”

***) wagon uznany jako optymalna konstrukcja w zakresie wagonów-cystern z uwagi na osiągnięty wskaźnik obciążenia użytkowego do objętości użytkowej

Podane wyżej wagony-cysterny wykazują bardzo dobry wskaźnik obciążenia użytkowego do objętości użytkowej. Wartości tego wskaźnika dla prędkości v=90 km/h oraz v=100 km/h dla poszczególnych typów wagonów przedstawiono w tabeli 3.

Wymagania w zakresie zabudowy elementów pochłaniających energię zderzenia w wagonach-cysternach są zawarte w karcie UIC 573 [13].

Konstruktorzy cystern powinni brać pod uwagę przy każdych zmianach, dotyczących budowy nowoczesnych cystern, dotychczas obowiązujące przepisy zawarte w następujących kartach UIC i raportach ERRI:

- karcie UIC 505-1 [5] dotyczącej skrajni kinematycznej
- karcie UIC 521 [8] dotyczącej swobodnej przestrzeni, którą należy utrzymać na końcach wagonów towarowych
- karcie UIC 530-2 [10] dotyczącej bezpieczeństwa jazdy podczas przejazdu przez łuk „S”
- karcie UIC 533 [11] dotyczącej zabezpieczenia przez uziemienie wagonów przed porażeniem prądem elektrycznym personelu obsługującego
- karcie UIC 535-2 [12] dotyczącej wsporników sygnałowych
- karcie UIC 577 [14] dotyczącej ogólnych wymagań wytrzymałościowych wynikających z obciążeń dla wagonów-cystern.

W szczególności należy przestrzegać następujących zasad:

- ◆ Przy przeprowadzaniu prób nabiegania zgodnie z raportem ERRI B12/Rp.17 [18] nie może powstać żadne odkształcenie trwałe (plastyczne) elementów zderzno-pochłaniających na wagonie-cysternie przy wystąpieniu maksymalnego obciążenia; próby muszą być przeprowadzone przy prędkości max.12 km/h
- ◆ Elementy zderzno-pochłaniające zintegrowane ze zderzakami lub zabudowane pomiędzy zderzakami i czołownicą muszą spełniać zachowanie przestrzeni zgodnie z kartą UIC 526-1, załącznik 2 [9]
- ◆ Elementy zderzno-pochłaniające muszą spełniać przepisy załącznika F karty UIC 573 [13]
- ◆ Wagony muszą posiadać oznakowanie zgodne z przepisami RIV [19]
- ◆ Wagony-cysterny, które przewożą ładunki niebezpieczne muszą odpowiadać przepisom RID [17]
- ◆ W przypadku normalnej eksploatacji, w której występują nabiegania do prędkości 12 km/h, w elementach zderzno-pochłaniających nie mogą powstać żadne odkształcenia trwałe.

W przypadku wagonów towarowych pasywne bezpieczeństwo zyskuje coraz bardziej na znaczeniu, przy czym obok ochrony ładunków oraz personelu obsługującego, bardzo ważny aspekt oceny taboru do przewozów towarowych stanowi obniżenie kosztów utrzymania i konserwacji, napraw oraz zwiększająca się dyspozycyjność wagonu do eksploatacji.

Punktem wyjścia do określenia wymagań szczegółowych dla elementów zderzno-pochłaniających jest precyzyjne określenie stanów eksploatacyjnych, jakim powinny one sprostać i tak:

- **1-szy stopień (zakres) eksploatacji** obejmuje **normalną eksploatację** przetokowo-manewrową i lekkie zderzenia, które sprowadzają się do nabiegania wagonu do prędkości 12 km/h; górna granica tego stopnia eksploatacji musi mieć zakres do prędkości 15 km/h
- **2-gi stopień (zakres) eksploatacji** obejmuje **ciężkie kolizje** z prędkościami do 40 km/h. W tym przypadku cała energia zderzenia powinna być przejęta przez elementy zderzno-pochłaniające. Konstrukcja pojazdu i pozostałe urządzenia zewnętrzne powinny pozostać nieuszkodzone. Z reguły naprawa wagonu po kolizjach z taką prędkością sprowadza się do wymiany elementów zderzno-pochłaniających na nowe. Zdarzają się przypadki naprawy korpusu zderzaka, aby z powrotem przygotować do eksploatacji zderzak z elementami zderzno-pochłaniającymi.

- **3-ci stopień (zakres) eksploatacji** obejmuje **bardzo ciężkie kolizje** z prędkościami powyżej 40 km/h. Należy liczyć się z uszkodzeniami w pojazdach uczestniczących w zderzeniach, ale można jednocześnie ograniczyć ich rozmiary, bez specjalnego badania pojazdów uczestniczących w wypadku. Zapewniając dużą aktywną wartość trwałego odkształcenia wzdłużnego można osiągnąć również skuteczną ochronę przed „wspinaniem” się pojazdu w trakcie zderzenia.

Przy małych odkształceniach trwałych elementów zderzno-pochłaniających może się okazać, że dalsza eksploatacja jest możliwa do następnej naprawy okresowej. Dopóki nie jest „wyczerpane” odkształcenie elementów zderzno-pochłaniających można założyć, że istnieje pewność co do tego, iż w żadnej chwili zderzenia wielkość opóźnienia nie przekroczy wartości dopuszczalnej określonej podczas projektowania. Uzasadnieniem wprowadzenia dodatkowych środków zabezpieczających przed skutkami zderzeń jest struktura wypadków, które miały miejsce w latach 1985÷1995 na sieci DB AG wg [3] (tabela 4). Szczególnego znaczenia nabiera fakt, że najwięcej wypadków w analizowanym okresie wydarzyło się przy prędkości do 36 km/h.

2.2. Wymagania szczegółowe

Koncepcja elementów zderzno-pochłaniających opiera się na zasadniczym założeniu, że w przypadku tradycyjnego wyposażenia w zderzaki, dopuszczalna wielkość przemieszczenia wynikającego ze zderzeń pojawiających się w normalnej eksploatacji wynosi 105 mm (skok zderzaka). Wobec faktu, że długość zderzaka w stanie swobodnym wynosi 620 mm, to rezerwa konstrukcyjna, która może być wykorzystana przy zderzeniach nadzwyczajnych wynosi 505 mm. W świetle aktualnych wymagań dotyczących pasywnego bezpieczeństwa pojazdów szynowych ta rezerwa może być uznana jako wada dzisiejszych konwencjonalnych rozwiązań. Dla pojazdów z wysokimi prędkościami zgodnie z Dyrektywą Europejską wg [2] zaleca się, aby były one przystosowane dla przejęcia energii zderzenia wynoszącej 1 000 kJ na jeden koniec pojazdu przy wielkości odkształcenia trwałego wynoszącego 270 mm. W przypadku wagonów towarowych i lokomotyw zrealizowanie takiego wymagania nie wydaje się możliwe z uwagi na bardzo ograniczoną przestrzeń do możliwej zabudowy elementów zderzno-pochłaniających.

Elementy pochłaniające energię przy zderzeniach nadzwyczajnych powinny zaabsorbować energię odpowiadającą prędkości nabiegania wynoszącej **18÷54 km/h (5÷15 m/s)**.

Odbiory elementów pochłaniających energię, zabudowanych w zderzakach lub pomiędzy zderzakami lub czołownicą pojazdu muszą być przeprowadzone z uwzględnieniem następujących wymagań:

Zestawienie wypadków na sieci kolejowej DB AG w latach 1985+1995 wraz ze strukturą ich skutków wg [3]
Tabela 4

Zestawienie wypadków kolejowych z wagonami-cysternami w latach 1985+1995		Wyciek ładunku niebezpiecznego		Uszkodzenia na cysternach z wyciekami ładunku podczas wypadku	
zderzenie czołowe	45,7%	zderzenie czołowe	26,3%	armatura, urządzenia opróżniające,	34%
zderzenie boczne	9,4%	zderzenie boczne	6,9%	płatcz zbiornika	23%
wykolejenie	43,5% ¹⁾	wykolejenie	5,7%	dno zbiornika	39%
pozostałe wypadki	1,4%	Pozostałe wypadki	0,8%	osadzenie na siodle	4%

¹⁾ z czego 35.9% stanowią wykolejenia związane z przewróceniem pojazdu

- wkład elementów sprężystych musi spełniać wymagania karty UIC 526-1 [9]
- próbę statyczną należy przeprowadzić dla uzyskania pełnego odkształcenia sprężystego lub plastycznego przy prędkości próbnej wynoszącej maksymalnie 5 mm/s. Siły: inicjująca i średnia siła wywołująca odkształcenia w zakresie plastycznym są mierzone
- próbę dynamiczną należy przeprowadzić (próba stanowiskowa lub rzeczywista) na pojeździe z elementem pochłaniającym energię, przy prędkości nabiegania **5 do 15 m/s**. Masę i energię należy dobrać tak, aby osiągnąć przynajmniej **75%** nominalnego odkształcenia w zakresie plastycznym, przy czym siła inicjująca musi być większa niż **1500 kN**. Średnia siła odkształcenia zakresu plastycznego musi być mniejsza niż **2 200 kN**
- bilansu energetycznego dokonuje się na podstawie dwóch następujących po sobie prób zgodnie ze wzorem:

$$W_d = W_s + \bar{F}_d \cdot S_p \quad (1)$$

gdzie:

W_d - energia przejęta

W_s -energia przejęta w zakresie sprężystym

\bar{F}_d -średnia , dynamiczna siła odkształcenia w zakresie plastycznym

S_p -nominalne odkształcenie w zakresie plastycznym, które zostało osiągnięte w próbie statycznej.

Energia W_d musi być większa lub równa **400 kJ** dla elementów pochłaniających energię dla nowobudowanych wagonów towarowych, a dla elementów pochłaniających energię dla istniejących wagonów, które były budowane przed 1-szym stycznia 2005, większa lub równa **250 kJ**.

W przypadku elementów pochłaniających energię, które są zintegrowane (połączone) z konstrukcją pudła wagonu zagadnienie dotyczące wymagań jest jeszcze otwarte.

Elementy pochłaniające (crashelemente) energię przy zderzeniach nadzwyczajnych mogą posiadać alternatywną zabudowę tzn. albo są zintegrowane ze zderzakami (zabudowane w zderzakach) lub są zabudowane pomiędzy zderzakami i ostoją wagonu.

Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że są to plastycznie odkształcalne elementy posiadające kształt rurowy, wykonane z metalu lub elementy posiadające konstrukcję węzową (plastra pszczelego). Elementy pochłaniające energię podczas eksploatacji nadzwyczajnej są stosowane zarówno w pojazdach szynowych do transportu osobowego jak również do transportu towarowego. We wszystkich przypadkach elementów zderzno-pochłaniających obowiązuje zasada utrzymania ich minimalnej masy własnej, co jest zgodne z nowoczesnymi tendencjami rozwojowymi wagonów towarowych, gwarantując przy ograniczeniu dopuszczalnego nacisku zestawu kołowego na tor dla poszczególnych klas toru maksymalną ładowność. Jest to jeden z istotnych parametrów użytkowo-eksploatacyjnych oceny elementu zderzno-pochłaniającego oraz wagonu-cysterny jako całości.

Elementy zderzno-pochłaniające powinny być przystosowane do przejmowania energii w najbardziej niekorzystnych sytuacjach eksploatacyjnych tzn.:

- przy ekscentrycznym obciążeniu wynikającym ze współpracy dwóch sąsiednich wagonów w kierunku pionowym oraz poziomym; ekscentryczność w kierunku pionowym może wynikać z sprzężenia dwóch wagonów-cystern: jednego w stanie nowym oraz drugiego w stanie zużyty (ekscentryczność w kierunku pionowym wynosi ok. 40 mm). Ekscentryczność w tym kierunku może osiągać jeszcze większe wartości np. wynikające z maksymalnej i minimalnej wysokości zderzaków określonych w przepisach RIV [19]. Ekscentryczność w kierunku poziomym może wynikać z

luzów poprzecznych przymaźniczych oraz ze współpracy wagonu wyposażonego w skrajnie zużyte zestawy kołowe z wagonem w stanie nowym

- przy skośnym zderzeniu, które może wystąpić na łuku o najmniejszym promieniu; dla $R=150$ m kąt skośnego zderzenia przyjmuje się jako 10° .

2.2.1. Bezpieczeństwo pasywne wagonów-cystern budowanych przed styczniem 2005 roku z elementami pochłaniającymi zabudowanymi w zderzakach

W przypadku wagonów wyprodukowanych przed styczniem 2005 z elementami pochłaniającymi zabudowanymi w zderzakach (zintegrowanych ze zderzakami) elementy sprężyste powinny posiadać możliwość przejścia łącznej energii przez odkształcenia sprężyste oraz plastyczne ≥ 500 kJ (**0,5 MJ**), natomiast w przypadku energii mniejszej niż **250 kJ** nie powinno wystąpić żadne odkształcenie trwałe.

Zgodnie z wytycznymi karty UIC 573 [13] każdy koniec wagonu wyposażonego w takie elementy powinien spełniać następujące wymagania:

- ♦ dynamiczna energia, która może być pochłonięta przez odkształcenie sprężyste zderzaka i plastyczne odkształcenie elementu pochłaniającego energię musi być ≥ 250 kJ
- ♦ dynamiczna siła, przy której następuje inicjacja odkształcenia plastycznego elementu pochłaniającego energię na prostym torze musi być > 1500 kN
- ♦ średnia siła plastycznego odkształcenia elementu pochłaniającego energię musi być $< 2\ 200$ kN¹⁾
- ♦ urządzenie rejestrujące plastyczne odkształcenie, które jest zabudowane w zderzaku, musi spełniać następujące warunki:
 - być widoczne w całym zakresie żywotności zderzaka
 - działać przy wystąpieniu odkształcenia plastycznego mniejszego niż 10 mm
- ♦ zderzak wyposażony w dodatkowe elementy pochłaniające energię musi dodatkowo otrzymać w oznaczeniu literę **X** (przykładowe oznaczenie **AX** lub **CX**).

Wkład sprężysty zderzaka musi odpowiadać karcie UIC 526-1 [9]. Aby można było zastosować zderzaki kategorii A, nie może zadziałać element pochłaniająco-zderzny przy nabieganiach z prędkością do 12 km/h przy zachowaniu warunków zgodnych z raportem ERRI B12Rp.17 [18] i nie może wystąpić żadne

przekroczenie dopuszczalnych naprężeń w materiale na wagonie (czołownica, elementy połączeniowe, mocowanie zbiornika, zbiornik). Jeśli przynajmniej jeden z powyższych warunków nie zostanie zachowany, wówczas należy zastosować zderzaki kategorii C.

W przypadku wagonów budowanych przed styczniem 2005 roku z elementami pochłaniającymi energię zabudowanymi w konstrukcji wagonu sprawa sformułowania odpowiednich przepisów lub wymagań jest jeszcze otwarta.

2.2.2. Bezpieczeństwo pasywne wagonów cystern nowobudowanych po styczniu 2005 roku z elementami pochłaniającymi zabudowanymi w zderzakach

Dla wagonów-cystern zastosowanie tego typu elementów określa karta UIC 573 [13]. Zgodnie z wytycznymi tej karty UIC każdy koniec wagonu wyposażonego w takie elementy powinien spełniać następujące wymagania:

- ♦ elementy pochłaniające powinny posiadać możliwość przejścia łącznej energii przez odkształcenia sprężyste oraz plastyczne ≥ 800 kJ (**0,8 MJ**), natomiast w przypadku energii mniejszej niż **400 kJ** nie powinno wystąpić żadne odkształcenie trwałe, co odpowiadałoby normalnej próbie nabiegania wagonu-cysterny w stanie ładownym o masie brutto 90 000 kg z prędkością $v=12$ km/h
- ♦ dynamiczna energia, która może być pochłonięta przez odkształcenie sprężyste zderzaka i plastyczne odkształcenie elementu pochłaniającego energię musi być ≥ 400 kJ
- ♦ dynamiczna siła, przy której następuje inicjacja odkształcenia plastycznego elementu pochłaniającego energię na prostym torze musi być > 1500 kN
- ♦ średnia siła plastycznego odkształcenia elementu pochłaniającego energię musi być $< 2\ 200$ kN¹⁾
- ♦ urządzenie wskazujące (rejestrujące) plastyczne odkształcenie, które jest zabudowane w zderzaku musi spełniać następujące warunki:
 - być widoczne w całym zakresie żywotności zderzaka
 - działać przy wystąpieniu odkształcenia plastycznego mniejszego niż 10 mm
- ♦ zderzak wyposażony w elementy pochłaniające energię musi dodatkowo otrzymać w oznaczeniu literę **X** (przykładowe oznaczenie **AX** lub **CX**).

¹⁾ Podwozie wagonu musi być zbadane przy uwzględnieniu krótkotrwałej średniej siły plastycznego odkształcenia. Statyczna próba ściskania zgodnie z raportem ERRI B12/Rp 17 wystarczy do weryfikacji tego wymagania

Wkład sprężysty zderzaka musi odpowiadać karcie UIC 526-1 [9]. Aby można było zastosować zderzaki kategorii A, nie może zadziałać element pochłaniająco-zderzny przy nabieganiach z prędkością 12 km/h przy zachowaniu warunków zgodnych z raportem ERRI B12Rp.17 [18] i nie może wystąpić żadne przekroczenie dopuszczalnych naprężeń w materiale na wagonie (czołownica, elementy połączeniowe, mocowanie zbiornika, zbiornik).

Producenci elementów zderzno-pochłaniających muszą to udowodnić podczas prób nabiegania w stanie ładownym. Jeśli przynajmniej jeden z powyższych warunków nie zostanie zachowany, wówczas należy zastosować zderzaki kategorii C.

W przypadku wagonów budowanych po styczniu 2005 roku z elementami pochłaniającymi energię zabudowanymi w konstrukcji wagonu sprawa sformułowania odpowiednich przepisów lub wymagań jest jeszcze otwarta.

2.3. Analizy teoretyczne

Przy analizach teoretycznych zjawisk zderzeń z udziałem wagonów-cystern należy uwzględnić przede wszystkim specyfikę pojazdu. Wynika ona z przeznaczenia pojazdu, który w wielu przypadkach służy do przewozu ładunków niebezpiecznych, w związku z czym sprawy ochrony środowiska i ochrony personelu obsługującego mają znaczenie priorytetowe. Przy koncepcji nowych elementów zderzno-pochłaniających należy wziąć pod uwagę, że ustrój nośny cysterny (ostoja, zbiornik, połączenia) musi też być odporny na zderzenia. W związku z czym przy projektowaniu wagonów cystern należy zwrócić uwagę na gatunki stali o wysokiej granicy plastyczności. Wówczas zdolność do przejmowania jednostkowej energii (kJ/m^2) w zakresie sprężystym zwiększa się zgodnie z zależnością:

$$\Phi = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{0,2}^2}{E} \quad (2)$$

gdzie:

- Φ - jednostkowa energia dla określonego materiału gwarantująca zakres odkształcenia sprężystego oraz braku odkształceń trwałych w materiale wyrażona w [MPa]
- $R_{0,2}$ - granica plastyczności określonego gatunku stali [MPa]
- E - moduł Younga; dla stali 2.05×10^5 [MPa].

Tak więc wyposażenie wagonu-cysterny w określone elementy o dużej zdolności pochłaniania energii może okazać się zabiegiem niewystarczającym, jeśli weźmie się pod uwagę konstrukcję nośną nieodporną na zderzenia. Dotyczy to zwłaszcza wagonów-cystern modernizowanych, zbudowanych przed 1.01.1995. W przypadku nowobudowanych cystern poszukiwanie

stali o wysokiej granicy plastyczności $R_{0,2}$ oraz wysokiej granicy wytrzymałości na rozciąganie R_m na wszystkie elementy nośne wydaje się być koniecznością wobec zwiększonych wymagań odporności konstrukcji przed skutkami zderzeń. Wyższe parametry wytrzymałościowe można otrzymać przez zwiększenie zawartości węgla jak również przez zwiększoną zawartość pierwiastków stopowych i ich umiejętną kombinację, co jednak może wpłynąć niekorzystnie na cieplny równoważnik węgla, a tym samym spawalność stali. Pewną trudność w projektowaniu wagonów mających spełnić wymagania przeciwdrożeń stonowi wymagane dostosowanie konstrukcji do montażu sprzęgu samoczynnego, który ma w przyszłości zastąpić obecne urządzenie ciągnikowo-zderzne, sprzęg śrubowy oraz obydwie zderzaki [16]. Pewnym wyjściem naprzeciw obecnym wymaganiom dla nowobudowanych wagonów towarowych jest zachowanie 300 mm odległości pomiędzy końcem ostoi, a końcem zbiornika. Jest to ewentualna rezerwa chroniąca płaszcz zbiornika przed zgniotem w przypadku zderzenia. Tendencje rozwojowe wagonów cystern idą naprzeciw wymogom bezpieczeństwa. Okazuje się, że bardziej jest prawdopodobne zwiększenie nacisku zestawu kołowego na tor jako konsekwencja zwiększonej ładowności, niż zwiększenie prędkości. Nie jest przecież żadnym problemem zwiększenie prędkości w stanie ładownym do 120 km/h przy nacisku zestawu kołowego na szyny 20 t, a nawet do 160 km/h przy nacisku zestawu kołowego na szyny wynoszącym 18 t. Układy biegowe są do takiego ruchu przygotowane jak np. standardowy wózek Y37.

Podstawowym parametrem przy analizie zjawiska zderzeń jest energia kinetyczna poruszającego się pojazdu, którą można określić ze wzoru (2) podanego w [1].

Wartości energii kinetycznej dla wagonów cystern wyposażonych w różne układy biegowe przedstawiono w tabeli 5.

Jak wynika z tabeli 5, zwiększenie prędkości wagonów-cystern do prędkości 120 km/h (przy nacisku zestawu kołowego na szyny 20 t lub 22.5 t) lub do 160 km/h (przy nacisku zestawu kołowego na szyny 18 t) jest mało prawdopodobne ze względu na zwiększenie ryzyka związanego z niekontrolowanym zderzeniem. Znacznie bezpieczniejsze wydaje się zwiększenie ładowności, poprzez zwiększenie dopuszczalnego nacisku zestawu kołowego na szyny wynoszącego 25 t (wariant III). Wskaźnik wzrostu zdolności transportowych w stosunku do wariantu podstawowego wynosi 1.25, przy takim samym wskaźniku wzrostu energii kinetycznej. W przypadku wariantu IV (prędkość 120 km/h i maksymalny nacisk zestawu kołowego na szyny 20 t) wskaźnik wzrostu zdolności transportowych zwiększył się tylko do 1.2, natomiast wskaźnik wzrostu energii kinetycznej aż do 1.44. Zwiększanie prędkości, nawet przy już przebadanych układach biego-

Zestawienie wartości energii kinetycznych dla cystern z różnymi układami biegowymi Tabela 5

Numer wariantu	Wariant I	Wariant II	Wariant III	Wariant IV	Wariant V	Wariant VI
Typ układu biegowego	Y25Cs Y25Cs2 Y25Rs	Y25Lsd Y25Lsd1	Y25XL(s)s	Y25Css Y25Rss Y25Ls(s) Y25Ls(s)1	Y25Lss	Y37
Prędkość w km/h	100	100	100	120	120	160
Maks. nacisk zestawu kołowego na szynę w t	20	22.5	25	20	22.5	18
Maks. masa brutto w kg	80 000	90 000	100 000	80 000	90 000	72 000
Prędkość × masa w km/h × kg	8 000 000	9 000 000	10 000 000	9 600 000	10 800 000	11 520 000
Wskaźnik wzrostu zdolności transportowych ¹⁾	1	1.12	1.25	1.2	1.35	1.44
Energia kinetyczna w kJ	30864.19	34 722.22	38 580.24	44 444.44	50 000	71 111.11
Wskaźnik wzrostu energii kinetycznej ¹⁾	1	1.12	1.25	1.44	1.62	2.304

¹⁾ wskaźnik wzrostu odnosi się do wariantu I jako podstawowego

wych i dostosowanych do produkcji seryjnej oraz do eksploatacji międzynarodowej (zachowanie prawidłowych własności biegowych przy różnych pochyleniach profilu główki szyny tzn. 1:20 dla SNCF, 1:30 dla SJ oraz 1:40 dla DB i PKP) wydaje się być bardzo kosztownym zabiegiem. Zwłaszcza dotyczy to wariantu V oraz VI. W tym przypadku układy biegowe Y25Lss oraz Y37 posiadają hamulec tarczowy, który ma wiele zalet (mniejsza emisja hałasu do środowiska np. wagon z wózkami Y37 wykazuje taką samą emisję hałasu przy prędkości 160 km/h jak wagon z wózkami standardowymi z zawieszeniem Y25 przy prędkości 120 km/h) ale to powoduje, że ten sam wagon jest

droższy, zwłaszcza na etapie wytwarzania. Koszty wytwarzania samych układów biegowych Y37 z tytułu wyposażenia w hamulec tarczowy są trzykrotnie wyższe aniżeli układów biegowych standardowych Y25 przystosowanych do prędkości 120 km/h i wyposażonych w hamulec klockowy. Kolejną istotną wadą zastosowania wózka Y37 są zwiększone luzy poprzeczne aż do 60 mm, co przy klasycznych wózkach posiadających luz poprzeczny przymaźniczny wynoszący zaledwie 10 mm może stanowić istotne ograniczenie zarysu zewnętrznego pojazdu z tytułu zwiększonych zwiężeń skrajni od zarysu odniesienia wg karty UIC 505-1 [5].

Zestawienie wartości energii kinetycznych dla dwóch wybranych typów cystern w różnych stanach eksploatacyjnych Tabela 6

Typ wagonu	Stan wagonu	Wartości energii kinetycznej w kJ dla poszczególnych stanów eksploatacyjnych oraz prędkości zderzenia						
		Zakres zderzeń I [km/h]				Zakres zderzeń II [km/h]	Zakres zderzeń III [km/h]	
		v=3	v=7	v=12	v=15		v=100	v=120
Wagon 5356.81 23500 kg 56 m ³	Stan próżny	8.15	44.42	130.55	203.99	1450.61	9066.35	13055.5
	Stan ładowny	27.77	151.23	444.44	694.44	4938.27	30864.19	
Wagon 8098.81 30200 kg 128 m ³	Stan próżny	10.48	57.09	167.77	262.15	1864.19	11651.23	16777.7
	Stan ładowny	31.25	170.13	500	781.25	5555.55	34722.22	

Zastosowanie ograniczników przesuwu pomiędzy wózkami i pudłem wagonu może zredukować ten luz 60 mm na łuku o promieniu $R=250\text{m}$ do 18 mm, co w znaczący sposób poprawia sytuację w zakresie wymaganych zwiężeń w stosunku do zarysu odniesienia.

W tabeli 6 przedstawiono energię kinetyczną dla dwóch cystern tzn. dla cysterny typu 5356.81 o masie własnej 23 500 kg i pojemności użytkowej 56 m^3 oraz dla cysterny typu 8098.81 o masie własnej 30 200 kg i pojemności użytkowej 128 m^3 , z uwzględnieniem różnych prędkości zderzeń.

Prędkości wynoszące odpowiednio 3, 7, 12 i 15 km/h należą do pierwszego zakresu zderzeń, objętego kontrolowaną eksploatacją i udokumentowanego próbami nabiegania zgodnymi z raportem ERRI B12/Rp.17 [18]. Prędkość 3 km/h występuje przy pracy manewrowej przeprowadzanej z bardzo dużą ostrożnością, prędkość 7 km/h z zachowaniem przeciętnych środków ostrożności, natomiast przypadek prędkości 12 i 15 km/h występuje przy pracy rozrządowej podczas staczania cystern z górki rozrządowych i wymaga zastosowania hamulców torowych znajdujących się u podnóża górki rozrządowej wyposażonych w szczęki, zmniejszające prędkość staczanej cysterny. Zakres prędkości pomiędzy 15 km/h oraz 40 km/h jest drugim zakresem, ale już nie zakwalifikowanym do normalnej eksploatacji i jest traktowany jako przypadek nadzwyczajny. Zderzenia z prędkością $v > 40\text{ km/h}$ można uznać jako przypadek ciężkiej kolizji, w których elementy zderzno-pochłaniające mogą już wyczerpać swój zakres działania.

Wychodząc z założenia, że element zderzno-pochłaniający musi posiadać zdolność do przejmowania energii większej niż 400 kJ (800 kJ na każdy koniec wagonu) można wyznaczyć prędkości nabiegania odpowiadające wartości tej energii.

Prędkość zderzenia dla cysterny o masie brutto 80 000 kg, odpowiadającą pochłonięciu energii 800 kJ wynosi:

$$v_{MIN} = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 800000}{80000}} \cdot 3,6 = 16,09 \text{ km/h}$$

Prędkość zderzenia dla cysterny o masie brutto 90 000 kg, odpowiadającą pochłonięciu energii 800 kJ wynosi:

$$v_{MIN} = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 800000}{90000}} \cdot 3,6 = 15,17 \text{ km/h}$$

W przypadku wagonu cysterny „458R” o masie własnej 25 700 kg prędkość zderzenia odpowiadającą pochłonięciu energii 800 kJ wynosi:

$$v_{MIN} = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 800000}{25700}} \cdot 3,6 = 28,40 \text{ km/h}$$

Wyniki obliczeń potwierdzają niektóre poglądy wyrażane w literaturze światowej, że dla obecnie projektowanych elementów zderzno-pochłaniających należy zwiększyć możliwość przejmowania energii $\geq 500\text{ kJ}$ [2]. Powyższe rozważania obejmują wagony-cysterny wyposażone w standardowe układy biegowe, przystosowane do nacisku zestawu kołowego na tor wynoszącego 22.5 t i spełniające wymagania karty UIC 518 [6] w zakresie własności dynamicznych pojazdu. W przypadku wagonów-cystern o zwiększonym nacisku zestawu kołowego na tor do 25 t i spełniających wymagania karty UIC 518-2 [7] w zakresie własności dynamicznych należy uwzględnić, że przy obliczaniu prędkości zderzenia przy założonej energii kinetycznej, masa wagonu w stanie próżnym będzie większa oraz masa brutto wynosi 100 t .

3. Wnioski

Z przeprowadzonej analizy jednoznacznie wynika, że wagony-cysterny powinny być wyposażone w dodatkowe elementy pochłaniające energię zderzenia. Wyposażenie tych wagonów w urządzenia zderzno-pochłaniające powinno być zrealizowane z uwzględnieniem wszystkich wymagań zawartych w karcie UIC 573 [13]. Koniecznością wydaje się zabezpieczenie cystern przed skutkami zderzeń w II zakresie eksploatacyjnym (do 40 km/h). W takim przypadku zabezpieczenie chroniłoby konstrukcję wagonu przed skutkami zderzenia wynikającymi również z przekroczenia dopuszczalnej prędkości 12 km/h podczas rozrządu z górki rozrządowej. Problem może wynikać z tego, że wagony-cysterny, podobnie jak inne wagony towarowe, nie mają zbyt dużo miejsca na zabudowę dodatkowych elementów pochłaniających. Zabudowa elementów zderzno-pochłaniających może więc być nieskuteczna, jeśli nie będą podjęte jednoczesne prace nad zastosowaniem stali o wysokich parametrach wytrzymałościowych, użytych na inne zespoły i podzespoły konstrukcji nośnej wagonu. Stale te powinny wykazywać się dobrą udarnością i spawalnością (utrzymanie cieplnego równoważnika węgla). Wysoka udarność stali powinna być utrzymana w szerokim zakresie temperatur, między innymi w temperaturach ujemnych (-25°C dla warunków środkowoeuropejskich oraz -40°C dla krajów skandynawskich).

Powyższe zalecenia obowiązują już, zwłaszcza przy budowie nowych wagonów towarowych.

Elementy zderzno-pochłaniające muszą również zachować swoje własności pochłaniania energii w niskich temperaturach, co wymaga ich zbadania w komorach klimatycznych oraz przeprowadzenia 2÷3 letniej eksploatacji obserwowanej na różnych typach wagonów- cystern. Eksploatacja obserwowana musiałaby objąć również okres zimy z trudniejszymi

warunkami klimatycznymi. Dotyczyłoby to elementów zderzno-pochłaniających zabudowanych w konstrukcji wagonu jak również zintegrowanych z konstrukcją zderzaków.

W świetle powyższych rozważań zastosowanie samych tylko elementów zderzno-pochłaniających może okazać się niewystarczające, aby całkowicie ochronić konstrukcję wagonu-cysterny przed skutkami zderzeń. Odporność na zderzenia wagonu jest również funkcją jego utrzymania. W związku z tym jego sprawność techniczna pomiędzy naprawami powinna być na bardzo wysokim poziomie. Dotyczy to również nadzoru podczas eksploatacji nad sprawnością elementów zderzno-pochłaniających.

Literatura

- [1] Nowicki J., Sobaś M.: Kryteria oceny zabezpieczenia pojazdów szynowych przed skutkami zderzeń. *Pojazdy Szynowe* Nr 3/2006.
- [2] Schneider S., Staub J.: *Kombiniertes Puffer- und Deformationselement für Schienenfahrzeuge*. ZEV+DET Glasers Annalen Nr. 123. 09.1999.
- [3] Alstom LHB GmbH: *Präsentation eines Sicherheits-Chemieesselwagens Cesa mit Crashversuchen*. ZEV+DET Glasers Annalen Nr. 124 07.2000.
- [4] Karta UIC 432: *Wagony towarowe. Prędkości jazdy. Warunki techniczne, które należy spełnić*. Wydanie 10-te z sierpnia 2005.
- [5] Karta UIC 505-1: *Pojazdy kolejowe. Skrajnie pojazdów*. Wydanie 10-te z maja 2006.
- [6] Karta UIC 518: *Badania i homologacja pojazdów kolejowych z punktu widzenia właściwości dynamicznych, bezpieczeństwa jazdy, obciążenia toru i parametrów biegowych*. 3-cie wydanie z sierpnia 2005.
- [7] Karta UIC 518-2: *Uzupełnienie do karty UIC 518: Zastosowanie do wagonów towarowych przystosowanych do nacisku zestawu kołowego większego niż 22.5 t i do 25 t*. 1-sze wydanie z 06.2004.
- [8] Karta UIC 521: *Wagony pasażerskie i wagony bagażowe, wagony towarowe, pojazdy trakcyjne. Wolne przestrzenie do zarezerwowania na końcach pojazdów*. 1-sze wydanie z dnia 1.01.1987 z erratą z dnia 01.07.1990.
- [9] Karta UIC 526-1: *Wagony towarowe. Zderzaki o skoku 105 mm*. 2-gie wydanie z 01.07.1998.
- [10] Karta UIC 530-2: *Wagony towarowe. Bezpieczeństwo jazdy*. 5-te wydanie z grudnia 2005.
- [11] Karta UIC 533: *Uziemianie ochronne części metalowych pojazdu*. 2-gie wydanie z 01.01.1977 z 4-tą zmianą z 01.01.1996.
- [12] Karta UIC 535-2: *Normalizacja i rozmieszczenie stopni, pomostów końcowych, mostków przejściowych, uchwytów, haków do lin, urządzeń uruchamiających pociągowy sprzęg samoczynny i kurków końcowych powietrza wagonów towarowych ze względu na zastosowanie sprzęgu samoczynnego na kolejach członkowskich UIC i OSŽD*. 4-te wydanie z 02.2006.
- [13] Karta UIC 573: *Warunki techniczne dotyczące budowy wagonów- cystern*. 6-te wydanie z 04.2005.
- [14] Karta UIC 577: *Wagony towarowe. Obciążenia*. 4-te wydanie z 12.2005.
- [15] Karta UIC 700: *Klasyfikacja linii kolejowych. Przynależne granice obciążenia wagonów towarowych*. 10-te wydanie z 11.2004.
- [16] ORE DT 320 (B12.B36): *Aktualny stan techniki wagonów towarowych i perspektywy na najbliższą przyszłość*. (Der aktuelle Zustand der Güterwagenteknik und die Aussichten für die nahe Zukunft). Utrecht, październik 1990.
- [17] RID: *Regulamin dla międzynarodowego przewozu kolejami towarów niebezpiecznych* (Reglement concernant le transport International ferroviaire des marchandises Dangereuses). Aneks I do załącznika B konwencji (Umowy) o międzynarodowym przewozie towarów kolejami (CIM). Grupa PKP-Przewozy Towarowe CARGO. Wyd. 01.07.2001.
- [18] *Raport końcowy ERRI B12/ Rp.17 (8-me wydanie): Program prób wagonów towarowych z podwoziem i strukturą wagonu ze stali (które nadają się do zabudowy sprzęgu samoczynnego pracującego na rozciąganie i na ściskanie) i których wózki mają ramę stalową*. (Versuchsprogramm für Güterwagen mit Untergestell und Wagenstrukturen aus Stahl (die für den Einbau der Automatischen Zug-Druck Kupplung geeignet sind) und deren Drehgestelle mit stählernem Drehgestellrahmen.) Utrecht, kwiecień 1997.
- [19] RIV: *Umowa o wymianie i użytkowaniu wagonów towarowych przez kolejowe przedsiębiorstwa przewozowe* (Regolamento Internazionale Veicoli). Wydanie obowiązujące od 07.2000.