

## Przedsięwzięcia materiałowe i konstrukcyjne zwiększające bezpieczeństwo pojazdów szynowych przed skutkami zderzeń

*W artykule przedstawiono środki konstrukcyjne i materiałowe zwiększające pasywne bezpieczeństwo pojazdów szynowych przed skutkami zderzenia. Jak wynika z nowoczesnych trendów rozwojowych w pojazdach szynowych, coraz częściej stosuje się specjalne elementy zderzno-pochłaniające oraz dostosowuje się konstrukcję pojazdu do przejścia coraz większej energii zderzenia. W opracowaniu przedstawiono również inne środki konstrukcyjne mające na celu zwiększenie pasywnego bezpieczeństwa pojazdów szynowych.*

*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 wyniku wzrostu roli „pasywnego bezpieczeństwa” pojazdów szynowych konstruktorzy i producenci są zmuszeni do oferowania nowoczesnych pojazdów szynowych, których konstrukcje są odporne na nadzwyczajne zderzenia. Pasywne bezpieczeństwo pojazdów szynowych obejmuje również konstrukcje już eksploatowane jak np. wagony-cysterny, co wynika z wymagań postawionych elementom zderzno-pochłaniającym (tzw. crashelemente) wg karty UIC 573 [15]. Nowoczesne konstrukcje są wytwarzane przy stałym nacisku na producentów, dotyczącym obniżenia ceny produktu finalnego. Oferowane pojazdy muszą więc posiadać taką konstrukcję, której koszty eksploatacji, wynikające z napraw oraz przeglądów okresowych, byłyby utrzymane na możliwie najniższym poziomie. Zasada ta dotyczy również elementów zderzno-pochłaniających oraz wszystkich innych przedsięwzięć konstrukcyjnych, które należy zastosować, aby spełnić wymagania pasywnego bezpieczeństwa pojazdów szynowych. Oznacza to „ewolucyjny” rozwój pojazdów szynowych, zwłaszcza w zakresie wagonów towarowych, gdzie rola zamienności części, produkcji wielkoseryjnej oraz obowiązujących przepisów unifikacyjnych jest największa [8,10,13 i 25]. Konstrukcja elementów zderzno-pochłaniających jest jednak zawsze uzależniona od specyfiki pojazdów szynowych. W przypadku wagonów towarowych wpływ obowiązujących przepisów dotyczących standaryzacji, unifikacji oraz zamienności na konstrukcję elementów zderzno-pochłaniających jest największy. W przypadku wagonów osobowych, a zwłaszcza wagonów metra i zespołów trakcyjnych przystosowanych do wysokich prędkości ( $v \geq 250$  km/h zgodnie z kartą UIC 660 [16]), elementy zderzno-pochłaniające oraz inne przedsięwzięcia konstrukcyjne zabezpieczające konstrukcję przed skutkami zderzeń

mogą być bardziej urozmaicone i przyjmować nietypowy kształt. W przypadku wagonów towarowych okresy międzynaprawcze są najdłuższe w porównaniu ze wszystkimi pojazdami występującymi w technice kolejowej. Istotne jest również sprawdzenie wymagań, stawianych nowoczesnym konstrukcjom pojazdów szynowych w zakresie zabezpieczenia przed skutkami zderzeń i w tym celu opracowuje się odpowiednie metodyki badawcze [3 i 6].

### 2. Przedsięwzięcia w zakresie nowych materiałów

#### 2.1. Nowe stale na elementy konstrukcji nośnych pojazdów

Energia kinetyczna poruszającego się pojazdu  $E_K$  podczas zderzenia dzieli się na energię odkształcenia sprężystego  $E_{SPR}$  oraz energię odkształcenia trwałego  $E_{TRW}$ . Bilans energetyczny zderzenia można zapisać następująco:

$$E_K = E_{SPR} + E_{TRW} \quad (1)$$

Podstawowym parametrem, który pozwala uniknąć odkształceń trwałych, względnie utrzymać je w określonym zakresie, jest granica plastyczności użytego materiału na konstrukcję.

Takim wskaźnikiem charakteryzującym konstrukcję jest tzw. *uogólniony wskaźnik wytrzymałościowy*  $W_{UOG}$ , który charakteryzuje zdolność materiału do przejścia największych obciążeń przy najmniejszych odkształceniach i najmniejszej masie elementu konstrukcyjnego i wyraża się wzorem:

$$W_{UOG} = \frac{R_{0,2} \cdot E}{\rho \cdot g} \quad (2)$$

gdzie:

$R_{0,2}$ -granica plastyczności zastosowanego materiału [MPa]

E- moduł Younga w [MPa]  
 ρ- masa właściwa [kg/m<sup>3</sup>]  
 g- przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>].

Konstrukcje wagonów towarowych oraz większości wagonów pasażerskich są wykonane ze stali i przeniesienie maksymalnej siły ściskającej, wynikającej ze zderzenia, jest zależne między innymi od granicy plastyczności stali  $R_{0,2}$ . W związku z tym na nowoczesne konstrukcje należy użyć wysokowytrzymałych stali, posiadających wysoką granicę wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  oraz wysoką granicę plastyczności  $R_{0,2}$ . Obecnie do wysokowytrzymałych stali, mających powszechne zastosowanie, można zaliczyć:

- stal S355 J2 wg normy PN-EN 10 025-2 [18], posiadającą granicę plastyczności  $R_{0,2}=355$  MPa oraz granicę wytrzymałości na rozciąganie  $R_m=490-630$  MPa; często używany jest gatunek tej stali S355J2G1WC+N np. przez fabrykę Siemens SGP „Verkehrstechnik” na konstrukcje współczesnych układów biegowych [4]
- nowe wysokowytrzymałe stale typu Domex charakteryzujące się wysoką odpornością na czynniki atmosferyczne oraz korozję; ich rozwój promuje szwedzka firma SSAB (Swedish Steel GmbH).

Ich skład chemiczny oraz własności mechaniczne są przedstawione w tabelach 1 i 2 [23 i 24].

**Skład chemiczny stali typu „Domex” formowanych na zimno wg [23]**

**Tabela 1**

Gatunek stali	C <sub>max</sub> [%]	Mn <sub>max</sub> [%]	Si <sub>max</sub> [%]	P <sub>max</sub> [%]	S <sub>max</sub> [%]	Al <sub>min</sub> [%]	Inne pierwiastki
Domex 315 MC	0.10	1.30	0.03 <sup>1)</sup>	0.025	0.010	0.015	*)
Domex 355 MC	0.10	1.30	0.03 <sup>1)</sup>	0.025	0.010	0.015	*)
Domex 420 MC	0.10	1.50	0.03 <sup>2)</sup>	0.025	0.010	0.015	*)
Domex 460 MC	0.10	1.50	0.30 <sup>2)</sup>	0.025	0.010	0.015	*)
Domex 500 MC	0.10	1.50	0.30 <sup>2)</sup>	0.025	0.010	0.015	*)
Domex 550 MC	0.12	1.60	0.30 <sup>2)</sup>	0.025	0.010	0.015	*)
Domex 600 MC	0.12	1.80	0.30	0.025	0.010	0.015	**)
Domex 650 MC	0.12	2.00	0.30	0.025	0.010	0.015	**)
Domex 700 MC	0.12	2.10	0.30	0.025	0.010	0.015	**)

<sup>1)</sup> W przypadku galwanizowania na gorąco grubość powłoki cynkowej Zn wynosi 50÷80 μm.

<sup>2)</sup> Taka sama grubość powłoki cynkowej jest stosowana przy zawartości 0,03% krzemu. Jeśli stal nie podlega procesowi galwanizacji i stal z maksymalną zawartością Si wynoszącą 0.03% nie jest możliwa do stosowania, to wówczas zawartość krzemu musi wynosić powyżej 0,02%. Jeśli materiał jest galwanizowany na gorąco, to należy to wyspecyfikować zgodnie z przepisami.

\*) Nb -0.09% max., V-0.20%max., Ti- 0,15% max., suma zawartości pierwiastków Nb, V i Ti nie może przekraczać 0,22%.

\*\*\*) dla tych stali zagwarantowana jest taka sama zawartość pierwiastków jak w \*) i ponadto Mo- 0,50%max., B- 0,005% max.

Własności wytrzymałościowe stali typu „Domex” formowanych na zimno wg [23]

Tabela 2

Gatunek stali	Granica plastyczności R <sub>0,2</sub> [MPa]	Granica wytrzymałości na rozciąganie R <sub>mmin-max</sub> [MPa]	Minimalne wydłużenie względne w [%] dla blachy o grubości t [mm]		Praktyczne zastosowanie. Minimalny wymagany promień gięcia (≤90°) dla blachy o minimalnej grubości t [mm]		
			A <sub>80</sub> t<3	A <sub>5</sub> t≥3	t ≤ 3	3<t<6	t ≥ 6
Domex 315 MC	315	390±510	20	24	0,2t	0,3t	0,6t
Domex 355 MC	355	430±550	19	23	0,2t	0,3t	0,7t
Domex 420 MC	420	480±620	16	20	0,4t	0,5t	0,9t
Domex 460 MC	460	520±670	15	19	0,5t	0,7t	1,1t
Domex 500 MC	500	550±700	14	18	0,6t	0,8t	1,2t
Domex 550 MC	550	600±760	14	17	0,6t	1,0t	1,3t
Domex 600 MC	600	650±820	13	16	0,7t	1,1t	1,4t
Domex 650 MC	650 <sup>1)</sup>	700±880	12	14	0,8t	1,2t	1,5t
Domex 700 MC	700 <sup>1)</sup>	750±950	10	12	0,8t	1,2t	1,6t

<sup>1)</sup> dla grubości >8 mm minimalna granica plastyczności może być mniejsza o 20 MPa

Wymienione stale typu Domex MC można podzielić na:

- ◆ stale o wysokiej wytrzymałości, Domex HS (high steels): stale typu Domex 315MC, 355MC i 420MC
- ◆ stale o ekstra wysokiej wytrzymałości typu Domex EHS (extra high steels): stale typu Domex 460MC do 700MC.

Analizując skład chemiczny można wyciągnąć wniosek, że proponowane stale posiadają niską zawartość węgla, natomiast wysokie własności wytrzymałościowe osiąga się poprzez zastosowanie pierwiastków stopowych. Niska zawartość węgla poprawia spawalność, lecz wysoka zawartość pierwiastków stopowych pogarsza ją, co można uzasadnić stosując pojęcie tzw. cieplnego równoważnika węgla, wyrażającego się wzorem wg [2]:

$$C_E [\%] = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (3)$$

Dla stali Domex HS cieplny równoważnik węgla nie przekracza wartości 0,2%, dla stali Domex EHS wynosi przeciętnie ok.0,3% a maksymalnie nie przekracza 0,4% ( taka sama wartość jak dla stali S355J2). Zgodnie z [23 i 24] stale Domex HS oraz Domex EHS można zaliczyć do dobrze spawalnych kierując się zasadą, że jeśli:

- C<sub>E</sub><0,42%-stal jest dobrze spawalna
- 0,42%≤C<sub>E</sub> <0,6%-stal jest spawalna pod pewnymi warunkami (skład chemiczny i grubość blach)
- C<sub>E</sub>≥0,6%-stal jest trudnospawalna.

Wg [23 i 24] stale wysokowytrzymałe typu Domex HS oraz Domex EHS posiadają dobrą spawalność wszystkimi metodami spawalniczymi:

- w osłonie gazów obojętnych ( MAG, MIG, TIG)
- ręcznie (MMA)
- łukiem krytym ( SAW-submerged arc welding).

Można więc wyciągnąć wniosek, że stale typu Domex mogą być stosowane na konstrukcję nośną pojazdów szynowych, która będzie spełniała warunek przejmowania większej energii podczas zderzeń nadzwyczajnych, przyjmując dwa możliwe warianty skutków zderzeń:

- konstrukcja stalowa po zderzeniu nie wykazuje żadnych odkształceń trwałych, jak również granica plastyczności R<sub>0,2</sub> nie zostaje przekroczona
- konstrukcja stalowa po zderzeniu wykazuje odkształcenia trwałe, jednak nie doszło do utraty jej funkcji, ani też nośności konstrukcji.

Jednym z parametrów charakteryzujących materiał do przejmowania energii zderzenia jest energia sprężysta właściwa  $\Phi$ , którą określa się ze wzoru:

$$\Phi = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma^2}{E} \quad (4)$$

albo inaczej:

$$\Phi = \frac{1}{2} \cdot E \cdot \varepsilon^2 \quad (5)$$

gdzie:

$\sigma$ - naprężenie rozciągające [MPa],

$\varepsilon$ - odkształcenie względne [-],

E- moduł Younga [MPa].

Po wyprowadzeniu różnych zależności na energię sprężystą  $\Phi$  najbardziej przydatny do dalszych analiz jest wzór (4). Po uwzględnieniu, że  $\sigma=R_{0,2}$  wzór (4) przyjmuje postać:

$$\Phi = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{0,2}^2}{E} \quad (6)$$

gdzie:

$R_{0,2}$ - granica plastyczności odpowiadająca trwałemu wydłużeniu wynoszącemu 0,2% długości pierwotnej  $l_0$

W tabeli 3 dokonano zestawienia energii sprężystej  $\Phi$ , którą mogą przejść elementy konstrukcyjne w postaci prętów, wykonanych z różnych gatunków stali typu Domex bez przekroczenia granicy plastyczności oraz odkształceń trwałych, dla  $\rho=7860 \text{ kg/m}^3$  i  $E=2,06 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ .

Energia sprężysta właściwa  $\Phi$  jest energią jednostkową przypadającą na jednostkę objętości pręta stalowego o powierzchni F i długości l. W związku z tym, że  $1\text{MPa}=10^6 \text{ N/mm}^2$  oraz  $1\text{J}=1\text{N}\cdot\text{m}$  można zapisać następującą zależność:

$$\frac{J}{\text{mm}^3} = \frac{N \cdot m}{\text{mm}^3} = \frac{10^3 N \cdot \text{mm}}{\text{mm}^3} = 10^3 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Samo zastosowanie stali o wysokich własnościach wytrzymałościowych nie powoduje jeszcze zabezpieczenia konstrukcji przed skutkami zderzeń. Ważne jest również osiągnięcie optymalnej sztywności, której powiększenie można osiągnąć przez zastosowanie następujących zabiegów konstrukcyjnych:

- ◆ dążenie do wyeliminowania zginania jako obciążenia niekorzystnego ze względu na sztywność i wytrzymałość i zastąpienie go ściskaniem i rozciąganiem
- ◆ w przypadku elementów pracujących na zginanie-racjonalne rozstawienie podpór, eliminowanie rodzajów obciążenia niekorzystnego ze względu na sztywność
- ◆ w przypadku elementów skrzynkowych-stosowanie kształtów skorupowych, sklepionych, kulistych, eliptycznych itd.

Kolejnym parametrem wytrzymałościowym, który należy rozważyć przy określaniu kryteriów, jakie musi spełnić nowoczesna konstrukcja wykazująca się dużą odpornością na uderzenia jest udarność. Jak wynika z informacji przedstawionych w materiałach reklamowych [ 23 i 24]

**Zestawienie energii sprężystej  $\Phi$ , którą mogą przejść elementy konstrukcyjne w postaci prętów wykonanych z różnych gatunków stali typu Domex**

**Tabela 3**

L.p	Gatunek stali Cechy	Domex	Domex	Domex	Domex	Domex	Domex	Domex	Domex	Domex
		315MC	355MC	420MC	460MC	500MC	550MC	600MC	650MC	700MC
1	granica plastyczności $R_{\text{emin}}$ [MPa]	315	355	420	460	500	550	600	650 <sup>1)</sup>	700 <sup>1)</sup>
2	energia sprężysta $\Phi$ [J/mm <sup>3</sup> ]	240,8	305,8	428,1	513,5	606,7	734,2	873,7	1.025,4	1.189,3
3	wskaźnik $\frac{E}{R_{0,2}}$ [-]	653,9	580,2	490,4	447,8	412	374,5	343,3	316,9	294,2
4	wskaźnik wytrzymałości $\frac{R_{0,2} \cdot E}{\gamma}$ [N/mm]	8,41	9,48	11,22	12,28	13,35	14,69	16,02	17,36	18,70

<sup>1)</sup> dla grubości blach >8 mm minimalna granica plastyczności może być mniejsza o 20 MPa

stale typu Domex wykazują wysoką udarność w niskich (-20°C) oraz bardzo niskich temperaturach (-40°C). Odpowiednie zestawienie wartości udarności dla poszczególnych stali zawarto w tabeli 4.

Granica wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  i udarności złączy spawanych jest mierzona metodą Charpy'ego

V na próbkach stali formowanych na zimno. Przedstawione złącza wykonane są metodą MAG (spoina czołowa, mieszanka gazowa, powierzchnia spoiny umocniona w znacznym odstępstwie czasowym przed wykonaniem testu, spoiny czołowe typu V na próbkach o wymiarach 6 i 8 mm) jak również metodą laserową i plazmową.

**Zestawienie wyników testów udarności dla złączy spawanych wykonanych metodą: MAG, laserową i plazmową**

**Tabela 4**

L. p.	Metoda wykonania spoiny	Gatunek stali Domex (grubość w mm)	Elektroda	Ilość próbek	Ciepło doprowadzone [kJ/mm]	Test wytrzymałości w kierunku poprzecznym do spoiny			Test udarności wg Charpy'go (Charpy V)		
						$R_m$ [Mpa]	Miejsce złamania	Kierunek złamania	Poz. <sup>1)</sup>	Energia zderzenia J/cm <sup>2</sup> przy temp.	
										-20°C	-40°C
1	MAG	Dx355MC (6)	OK12.51	1	0,87	476	materiał rodzimy	kierunek wzdłużny	A B C	133 258 270	99 250 256
2	MAG	Dx500MC (6)	OK12.51	1	1,2	595	materiał rodzimy	kierunek wzdłużny	A B C	168 162 256	174 170 244
3	MAG	Dx500MC (6)	OK12.51	1 2	1,3 1,5	636	materiał rodzimy	kierunek wzdłużny	A B C	61 138 275	42 46 120
4	MAG	Dx650MC (6)	TD-T90	1 2	0,73 0,81	810	strefa wpływu ciepła	kierunek poprzeczny	A B C		207 51 107
5	MAG	Dx650MC (3)	SG700	1 2	0,61 1,2	774	materiał spawany	kierunek poprzeczny	A B C	176 72 89	172 46 58
6	MAG	Dx700MC (3)	OK13.13	1	0,29	829	materiał spawany				
7	MAG	Dx700MC (3)	OK13.13	1	0,33	846	strefa wpływu ciepła				
8	MAG	Dx700MC (8)	OK13.31	1	0,73 0,70 0,71	836	materiał rodzimy	kierunek wzdłużny	A B C	71 80 156	52 69 61
9	MAG	Dx700MC (8)	OK13.31	1 2	0,96 0,95	849	materiał rodzimy				
10	plazma	Dx355MC (8)	OK12.51	1	0,65	455	materiał rodzimy				
11	laser	Dx420MC (8)	-	1	0,38	539	materiał rodzimy	kierunek wzdłużny	A B C	198	117 245 302
12	laser	Dx700MC (6)	-	1	0,25	816	materiał rodzimy	kierunek wzdłużny	A B C	208 153 135	83 150 105

1) A= materiał spawany, B= linia łączenia, C= strefa wpływu ciepła (heat affected zone-HAZ) 1 mm od linii łączenia

Jak widać z tabel 2,3 i 4 ww. gatunki stali ze względu na:

- wysoką granicę plastyczności  $R_{0,2}$  oraz wysoką granicę wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$
- wysokie wartości udarności w całym potencjalnym eksploatacyjnym zakresie temperaturowym, a zwłaszcza w niskich temperaturach
- dobrą spawalność (cieplny równoważnik węgla  $C_E < 0,42\%$ )

mogą spełnić kryteria bezpieczeństwa pasywnego zmniejszającego bezpośrednio skutki zderzeń współczesnych konstrukcji pojazdów szynowych jak również jednocześnie spełnić wymagania do przeniesienia sił pionowych dla wagonów towarowych zgodnie z raportem ORE/ERRI B12/Rp.17 [25] oraz kartą UIC 566 [14].

Użycie ww. stali o podwyższonych własnościach wytrzymałościowych ma już miejsce w budowie pojazdów szynowych np. w wagonach towarowych (firma Schwab Verkehrstechnik AG [22]).

## 2.2. Inne nowe materiały na elementy konstrukcji nośnych pojazdów

We współczesnych pojazdach szynowych, którym jest postawione wymaganie minimalnej masy własnej oraz wymaganie pasywnego bezpieczeństwa, zaistniała konieczność poszukiwania materiałów cechujących się minimalną masą właściwą (mniejszą aniżeli stali, dla której  $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$ ) i cechujących się bardzo wysokimi parametrami wytrzymałościowymi. Inspiracją do tego było między innymi zastosowanie stopów aluminium w przemyśle lotniczym, które miało po raz pierwszy miejsce w 1919 roku przez zakłady lotnicze Junkersa [7]. Aluminium jako czysty pierwiastek posiada względnie niską wytrzymałość i bardzo dużą ciągliwość. Przykładem tego może być zdolność do walcowania folii aluminiowych o grubości  $5 \mu\text{m}$ , które pomimo małych grubości wykazują absolutną odporność na przepuszczanie promieni słonecznych i wykazują szczelność w przypadku oddziaływania gazów oraz pary. W przypadku stopów aluminium, w skład których wchodzi takie pierwiastki jak Mn, Mg, Si, Zn oraz Cu wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  można zwiększyć nawet do 800 MPa. W związku z powyższym stopy aluminium zostały zastosowane do konstrukcji pudeł wagonowych, zwłaszcza w wagonach osobowych oraz zespołach trakcyjnych przeznaczonych do wysokich prędkości. Najczęściej stosowanymi elementami są profile w kształcie rur o długości 600 mm, stosowane na konstrukcje pudeł wagonów osobowych z pojedynczą lub podwójną ścianką. Konstrukcja ta jest uźebrowana wspornikami jako wyrobami walcowanymi o szerokości 130 mm i o grubości nie mniejszej niż 3 mm. W przypadku zderzenia pojazdów, rury muszą przenieść siły wzdłużne. Jeśli te siły przekroczą nośność konstrukcji, to wówczas nastąpią jej trwałe odkształcenia. W przypadku przekro-

czenia granicznego stosunku szerokości wspornika do jego grubości, który zależy od granicy plastyczności materiału, wystąpi odkształcenie plastyczne, które jest powiązane z możliwością wystąpienia jego wybożenia. Plastyczna deformacja oznacza rozpraszanie energii, podczas gdy przy sprężystej niestateczności nie może być przejęta praktycznie żadna energia wynikająca ze zderzenia. W przypadku stopów aluminium przejmowanie energii jest naznaczone istotnym postępem. Niezwykle istotnym jest, aby w przypadku deformacji osiągnąć wysokie plastyczne odkształcenie. Przykładami stopów aluminiowych spełniających te wymagania jest stop  $\text{AlMgSi}_{0,7}$  o oznaczeniu EN AW 6005 oraz stop będący jego modyfikacją o oznaczeniu EN AW 6008, w którym dodatki stopowe takich pierwiastków jak Mn i Cr zostają zastąpione przez wanad (V). W wyniku powyższego specjalna obróbka cieplna o oznaczeniu T7 (wyżarzanie rozpuszczające mające na celu otrzymanie struktury jednofazowej i podhartowanie) pozwala osiągnąć takie stany, które umożliwiają osiągnięcie 50 % rzeczywistych odkształceń przy lekko zredukowanej granicy plastyczności  $\sigma_{0,2}$  do 180 MPa. Dlatego jest możliwe, że energia zderzenia jest przejęta w plastycznym zakresie wybożenia aż do momentu kiedy zostanie osiągnięte pełne „pofałdowanie” elementów konstrukcyjnych. Przy zastosowaniu pojazdów z pudłami aluminiowymi naprawa w celu dostosowania pojazdu do ponownej eksploatacji jest opłacalna przy zastosowaniu prostowania na zimno lub na gorąco i to tylko przy wystąpieniu małych plastycznych deformacji. Naprawy przeprowadza się również poprzez wycięcie uszkodzonych części i zastąpienie ich nowymi elementami. Miejsca wycięcia muszą być konsultowane z konstruktorami tak, aby znajdowały się one tam, gdzie występują najmniejsze naprężenia i aby spoiny naprawcze znajdowały się w strefach, które nie są narażone na niedopuszczalne wyężenie materiału przy działaniu obciążeń statycznych oraz zmęczeniowych.

## 3. Nowoczesne konstrukcje pojazdów szynowych spełniające wymagania pasywnego bezpieczeństwa

### 3.1. Zastosowanie nowych konstrukcji wagonów-cystern do przewozów ładunków niebezpiecznych

Odpowiedzią na nowe wymagania dotyczące bezpieczeństwa przed skutkami zderzeń jest nowoczesna konstrukcja wagonu-cysterny do przewozu ładunków niebezpiecznych zwana potocznie CeSa (skrót nazwy pojazdu szynowego „Chemiekesselwagen für erhöhte Sicherheitsanforderungen”), wyprodukowanego jako prototyp w dwóch wersjach, o pojemności użytkowej  $60 \text{ m}^3$  i  $70 \text{ m}^3$  [20]. Nowa cysterna została wyprodukowana przez firmę Alstom LHB GmbH w Salzgitter w ramach programu badawczo-rozwojowego, wspieranego przez Ministerstwo Oświaty i Rozwoju (BMBF).

Parametry obydwu odmian wagonu podano w tabeli 5.

**Zestawienie parametrów wagonu typu CeSa do przewozu materiałów niebezpiecznych**

**Tabela 5**

L.p.	Parametr pojazdu	Wartość parametru względnie oznaczenie
1.	Zarys skrajni kinematycznej	według karty UIC 505-1 [9]
2.	Masa własna wagonu o pojemności użytkowej ok. 60 m <sup>3</sup>	24 300 kg
3.	Masa własna wagonu o pojemności użytkowej ok. 70 m <sup>3</sup>	25 200 kg
4.	Typ wózka (układu bieżącego)	DB 652 (LHB 82)
5.	Typ hamulca	KE-GP-16''
6.	Długość zbiornika 60 m <sup>3</sup>	10 960 mm
7.	Długość zbiornika 70 m <sup>3</sup>	12 750 mm
8.	Średnica zbiornika	2 700 mm
9.	Materiał na zbiornik	stal nr 1.4571 wg [19]
10.	Ciśnienie obliczeniowe	10 bar
11.	Ciśnienie badawcze ( próbne)	4 bar
12.	Ciśnienie eksploatacyjne	3 bar
13.	Ciśnienie zewnętrzne	0,5 bar

Konstrukcja została opracowana na podstawie przeprowadzonej analizy wypadków na sieci kolejowej DB AG, które wystąpiły w okresie 1985÷1995.

Największe znaczenie przy opracowaniu nowego projektu miał fakt, że najczęściej wypadków odbyło się przy prędkości nie przekraczającej 10 m/s (36 km/h). Na podstawie wyników analiz opracowano wymagania, jakie powinna spełniać nowa konstrukcja, które sprowadzają się do:

- zachowania bezpieczeństwa przed skutkami zderzeń przy prędkości do 36 km/h, co należy osiągnąć przez wysokie przejmowanie energii przez pojazd
- efektywnej ochrony dna zbiornika, ulepszonej ochrony włazu, armatury i urządzeń opróżniających
- zmiany połączenia pomiędzy ostoją wagonu oraz zbiornikiem.

Ze wszystkich zrealizowanych wymagań konstrukcyjnych, które udało się spełnić, można wymienić:

- optymalnie elastyczne podwozie odporne na nabiegania do prędkości 15 km/h
- urządzenia przejmujące energię przy prędkościach nabiegania do 36 km/h przy małych ciśnieniach wewnętrznych, wynoszących 8 bar przy prędkości 40 km/h
- wysoka możliwość pochłaniania energii przez konstrukcję zbiornika, połączona z redukcją elementów usztywniających elementy do minimum

- nowy sposób osadzenia zbiornika tzw. sposób ślizgowy
- urządzenia chroniące zbiornik, osadzone z obu jego stron czołowych.

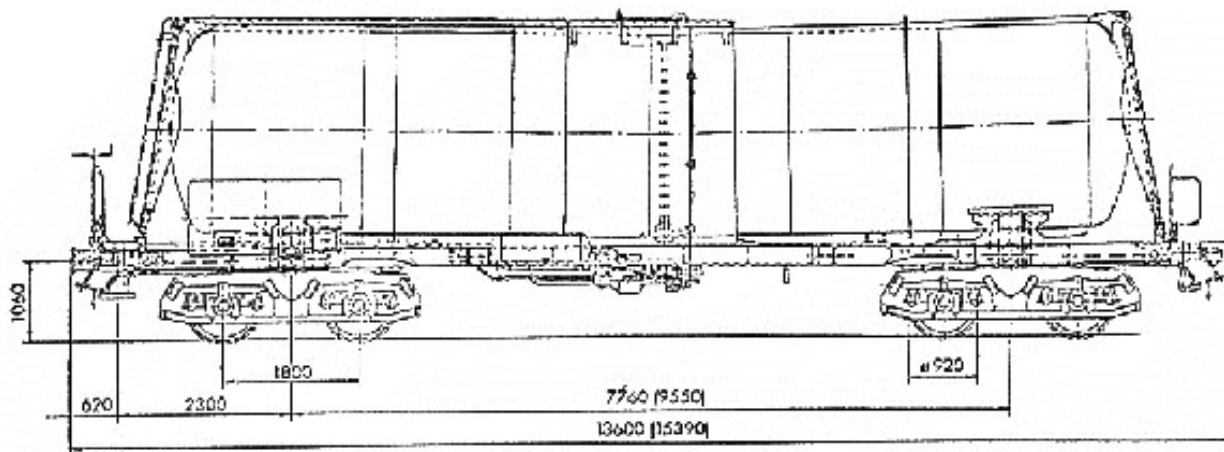
Równoległe do wagonów prototypowych typu CeSa rozpoczęto prace projektowo-wdrożeniowe w zakresie zespołu pochłaniającego energię, w którym dokonano integracji zabudowy zderzaka razem z elementem pochłaniającym energię przy zderzeniach nadzwyczajnych ( crashelement). Zintegrowane elementy zderzno-pociągowe były rozwijane przez brytyjską firmę Oleo International Ltd wspólnie z biurem projektowym Herbert Hoffmann w Bremen. Element ten może być zabudowany nie tylko w wagonach-cysternach, lecz w innych pojazdach szynowych, przy czym na drodze doświadczalno-badawczej dowiedziono jego przydatności do prędkości nabiegania wynoszącej 41,3 km/h.

Program badawczy prototypowych wagonów-cystern typu CeSa zakładał przeprowadzenie następujących czterech prób doświadczalnych:

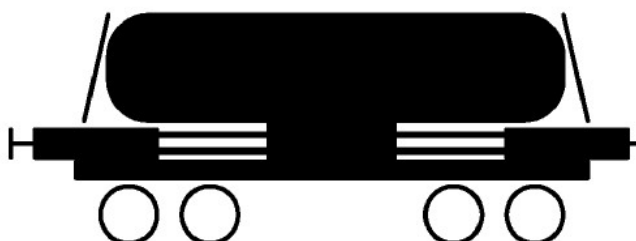
1. próbę nabiegania wagonu-cysterny CeSa o pojemności 60 m<sup>3</sup>, napełnionej do 95% wodą, z wymaganą prędkością 12 km/h ( dopuszczalna prędkość nabiegania przy próbach ) zgodnie z raportem ERRI B12 Rp.17 [25]; dokładna prędkość zmierzona podczas próby wynosiła 13,5 km/h, natomiast pojazdem nabiegającym ( taranem) był załadowany wagon do przewozu tłuszczu o masie brutto 80 000 kg; osiągnięte przyspieszenie wyniosło 2,5g (24,525 m/s<sup>2</sup>),
2. próby zderzenia z wymaganą prędkością 36 km/h; przy zmierzonej prędkości 35 km/h osiągnięto przejętą energię wynoszącą 2 MJ; wagon-cysterna wykazał po uderzonej stronie wgłębienie; elementy rozpraszające energię wykazały dwie deformacje w kształcie pofalowań,
3. tradycyjny wagon-cysternę o pojemności użytkowej 88 m<sup>3</sup> napełniono wodą do 70% całkowitej pojemności i wyposażono w dwa elementy przejmujące energię przy zderzeniach nadzwyczajnych oraz wykonano próbę zderzenia przy prędkości 35,4 km/h; elementy rozpraszające energię wykazały tylko cztery deformacje w kształcie pofalowań; pojazd po wymianie zintegrowanych elementów zderzno-pochłaniających ( tzw. Crashpuffer) w ciągu około jednej godziny był gotowy znów do eksploatacji, co zdaniem firmy Oleo International Ltd jest najlepszym rodzajem „przebrożenia” pojazdu,
4. dwa konwencjonalne stare wagony-cysterny o pojemności użytkowej 77 m<sup>3</sup> i wagon-cysternę o pojemności 88 m<sup>3</sup>, każdy załadowany do masy brutto 80 t zostały przekazane do

próby niszczącej, eliminującej w praktyce wagony z dalszej eksploatacji, przy czym prędkość nabiegania wynosiła 36 km/h; duże zakoczenie wywołał fakt, że tylko ramy wózków wykazały największe odkształcenia; zmierzone przyspieszenie podczas próby wyniosło 35g ( 343,35 m/s<sup>2</sup> ).

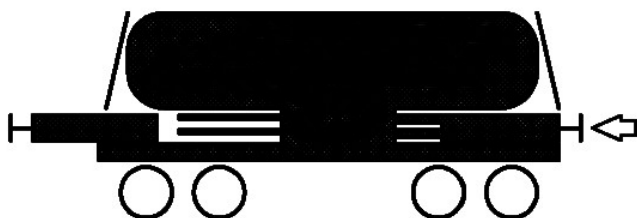
Przeprowadzone próby potwierdziły łatwość montażu i demontażu nowych zintegrowanych elementów zderzno-pochłaniających. Na rys.1 przedstawiono widok ogólny wagonu-cysterny CeSa. Na rys.2 przedstawiono układ zderzno-pochłaniający wagonu CeSa przed zderzeniem, natomiast na rys.3 po zderzeniu. Na rys.4 przedstawiono element zderzno-pochłaniający zastosowany w wagonie-cysternie do przewozu chemikaliów.



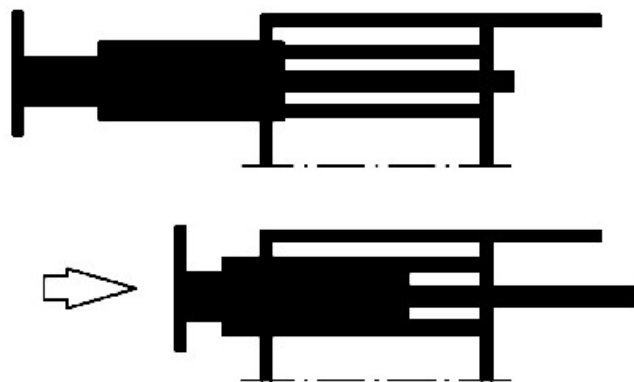
Rys.1. Wagon-cysterna do przewozu chemikaliów typu CeSa ( widok ogólny)



Rys.2. Układ zderzno-pochłaniający wagonu-cysterny typu CeSa do przewozu chemikaliów przed zderzeniem



Rys.3. Układ zderzno-pochłaniający wagonu-cysterny typu CeSa do przewozu chemikaliów po zderzeniu



Rys.4. Element zderzno-pochłaniający zastosowany w wagonie-cysternie do przewozu chemikaliów typu CeSa ( przed i po zderzeniu)

### 3.2. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych elementów zderzno-pochłaniających (tzw. crashelemente)

- Przykładem zastosowania nowych elementów zderzno-pochłaniających w pojazdach szynowych są tzw. crashelemente produkowane przez niemiecką firmę EST Eisenbahn-Systemtechnik GmbH w Wangen [21]. Cechami nowych konstrukcji tego typu, obok własności umożliwiających regularną eksploatację, są między innymi:

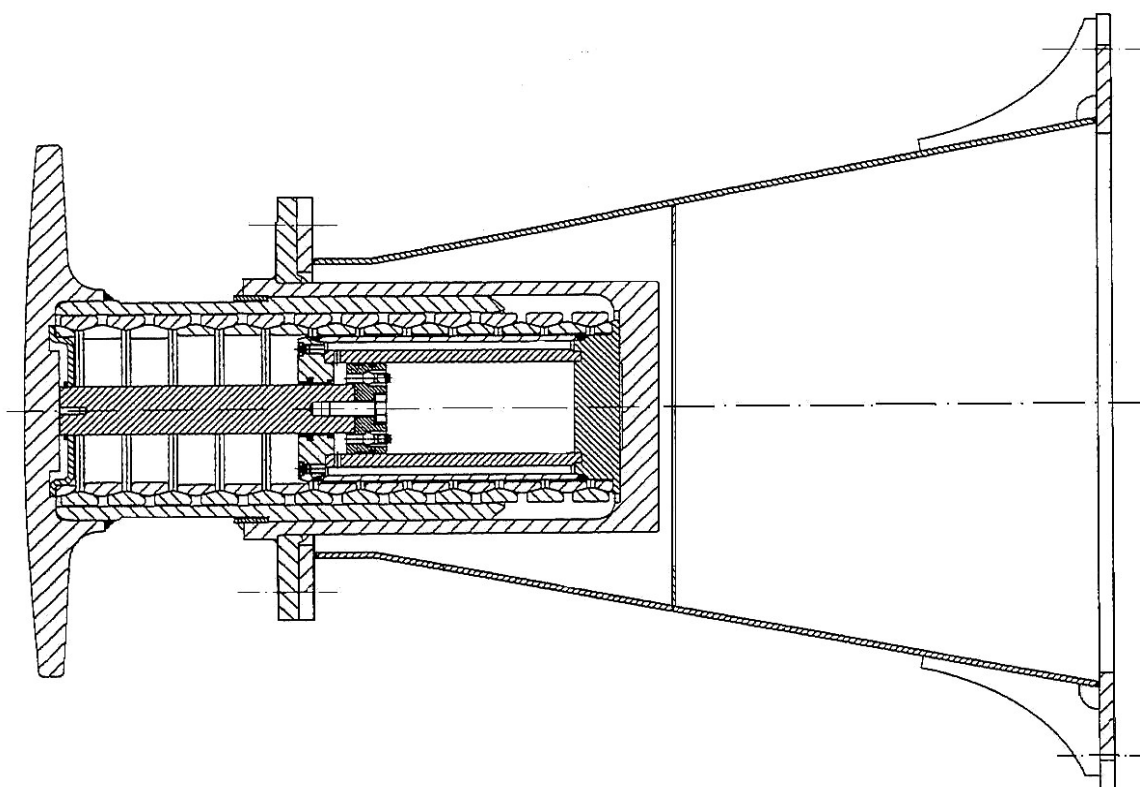


- standardowy zderzak i element deformacyjny, zintegrowany konstrukcyjnie, tworząc jeden zespół
- miejsce zabudowy oraz kołnierz (pokrywa do zabudowy) są takie same jak w zderzakach standardowych
- możliwość zabudowy elementów w wagonach towarowych „G1” oraz w wagonach osobowych „R1”
- wkład elastomerowy zderzaka spełniający wymagania według karty UIC 526-1[10] względnie według karty UIC 528 [12]
- bardzo mała masa własna 125 kg (przypadająca na jeden element zderzno-pochłaniający)
- konstrukcja korpusu elementów umożliwiająca odkształcenie wynoszące ok. 200 mm w przypadku kolizji pojazdów szynowych
- wersja standardowa umożliwiająca przejście siły wynoszącej 1500 kN przypadającej na jeden element zderzny (zderzak) i zdolność przejmowania energii około 600 kJ na końcu pojazdu/parę zderzaków i w zależności od różnych wersji wykonawczych możliwość przejścia siły w zakresie 1500±2000 kN na zderzak oraz zdolność przejmowania energii przy odkształceniach od około 400 do 700 kJ, przypadającej na jeden koniec pojazdu (parę zderzaków).

Elementy zderzno-pochłaniające realizują przejmowanie energii poprzez odkształcenie za pomocą zwijania (aufrollen), zamiast w dotychczasowej formie za pomocą sfałdowania (falten). Wszystkie ww. własności zostały potwierdzone poprzez próby wstępne na stanowiskach badawczych na Wyższej Szkole Inżynierskiej w Koblenz oraz podczas prób nabiegania, przeprowadzonych w ośrodku badawczym w Railmotive Görlitz.

- Następnym przykładem praktycznego rozwiązania jest kombinowana konstrukcja zderzaka i elementu odkształcalnego, przeznaczonego do lokomotyw oraz do wagonów towarowych, pokazana na rys.5.

Opis konstrukcji jest przedstawiony w [5]. Przy konstrukcji elementów tego typu wychodzi się z założenia, że zasadniczą wadą zderzaka standardowego jest względnie mała aktywna długość odkształcenia sprężystego wynosząca 105 mm w stosunku do całkowitej długości 620 mm. Istotą rozwoju nowego elementu przejmującego energię było wykorzystanie pozostałych do dyspozycji 500 mm. Wymagania, które postawiono nowemu elementowi zderzno-pochłaniającemu są przedstawione w tabeli 6.



Rys.5. Kombinowana konstrukcja zespołu do wagonów towarowych oraz lokomotyw

**Zestawienie wymagań dotyczących elementów zderzno-pochłaniających dla kombinowanej konstrukcji zespołu**

**Tabela 6**

L.p.	Element zespołu	Własność-Cecha	Wymaganie
1.	Zderzak	a) Tłumik hydrauliczny	Wkład sprężysty+ kapsuła hydrauliczna. Zderzak klasy C o możliwości przejmowania energii 70 kJ. Mała zależność poziomu siły od prędkości, odporność na działanie w niskich temperaturach
		b) Typ korpusu	Korpus tak ukształtowany i posiadający takie wymiary, że zderzak po wypadku pozostaje dalej w pełnej gotowości do pełnienia funkcji. Projekt według karty UIC 526-1 [10]
		c) Materiał	Z przyczyn cenowo-kosztowych stal St52-3 (S355J2)
2.	Element pochłaniający	a) Przejmowanie energii	Min. 1 MJ ( na parę)
		b) Średnia siła podczas deformacji	Znacznie poniżej 2000 kN ( na parę)
		c) Maksymalna siła na początku deformacji	Nie przekraczająca 2400 kN ( na parę). Wskutek tak względnie małego poziomu siły nie są konieczne w konstrukcji pojazdu żadne rezerwy wymiarowe. Oprócz tego powinna być zagwarantowana dobra kompatybilność z różnymi rodzajami pojazdów, które mogą podlegać zjawiskom zderzenia. Zależnie od masy pojazdu otrzymuje się określoną, z reguły bardzo małą wartość maksymalną dla opóźnienia podczas zderzenia
		d) Wielkość deformacji (odkształcenia)	Możliwie duża ok. 600 mm
		e) Mechanizm pochłaniający energię	Stabilny z możliwością odtworzenia kształtu przez np. fałdowanie, mała zależność poziomu siły od prędkości
		f) Zakres siłowy	2000 do 2400 kN
		g) Zakres przebiegu siły podczas odkształcenia	Oscylujący poziom siły z powodu zmiany kształtu przez fałdowanie
		h) Materiał	Ze względów kosztowo-cenowych stal St52-3( S355J2)
		i) Mocowanie	Mocowanie za pomocą śrub pomiędzy zderzakiem i elementem pochłaniającym i konstrukcją pojazdu, aby zapewnić możliwość szybkiej wymiany
3.	Cały zespół	a) Długość zabudowy	1100 mm, kołnierz w jednej płaszczyźnie z kołnierzem urządzenia pociągowo-zderznego
		b) Koszty LCC (Life Cycle Costs)	Możliwie minimalne
		c) Masa	Możliwie minimalna

Realizacja programu badawczego odbywała się przez następujących partnerów:

- zespół hydrauliczny zderzaka projektowała grupa z firmy Keystone w Halberstadt
- obliczenia wytrzymałościowe za pomocą metody elementów skończonych-NS Materieel w Utrechie

- opracowanie koncepcji i konstrukcji założeniowej elementu zderzno-pochłaniającego- prof. Wierzbicki (M.I.T Cambridge) i prof. Abramowicz (Uniwersytet Warszawski)
- próby dynamiczne- Impact Research Centre na Uniwersytecie Technicznym w Liverpoolu

- obliczenia i optymalizację zachowania się podczas „fałdowania” przeprowadzono w ścisłej współpracy z przedsiębiorstwem Industrieanlagen Betriebsgesellschaft mbH IABG w Ottobrunn
- odpowiedzialność za konstrukcję i przygotowanie elementów zderzno-pochłaniających jak również koordynację całościową tematu i prowadzenie programu badawczego-firma Krauss-Maffei Verkehrstechnik GmbH w Monachium.

Dane charakterystyczne zderzaka są następujące:

- kategoria zderzaka C zgodnie z kartą UIC 526-1 [10]
- własności statyczne zgodne z kartą UIC 827-2 [17]
- skok zderzaka 105,5 mm
- końcowa siła quasistatyczna 600 kN
- przejęta energia statyczna 32 kJ
- quasistatyczny współczynnik tłumienia 68%
- przejęta energia dynamiczna >70 kJ (do 12 km/h) oraz >100 kJ (przy osiągnięciu siły końcowej 1500 kN)
- dynamiczny współczynnik tłumienia 89%
- masa zderzaka 215 kg.

Dane charakterystyczne elementu pochłaniającego:

- przejęta energia >1MJ (przypadająca na parę)
- poziom przejętej siły 2000 do 2400 kN (przypadającej na parę)
- maksymalna siła podczas deformacji (odkształcenia) około 1800 kN (przypadająca na parę)
- długość deformacji >600 mm
- wymagania konstrukcyjne w oparciu o raporty ORE/ERRI: ERRI B205/Rp.1 [26], ERRI B 106/Rp.20 [27] i ERRI B106/Rp.26 [28]
- maksymalna prędkość zderzenia 40 km/h (masa brutto 86t dla obydwu zderzaków kategorii C)
- długość swobodna dla zabudowy 825 mm
- mocowanie zderzaka za pomocą śrub M24, natomiast elementu na pudle lokomotywy za pomocą śrub M30
- masa: 101 kg.

- Kolejną konstrukcją, która spełnia wymagania nowoczesnych trendów rozwojowych w tym zakresie jest nowy zderzak szwajcarskiej firmy Schwab Verkehrstechnik AG w Schaffhausen [22]. Firma ta opracowała nowy zderzak posiadający skok 350 mm i możliwość przenoszenia maksymalnej siły o wartości

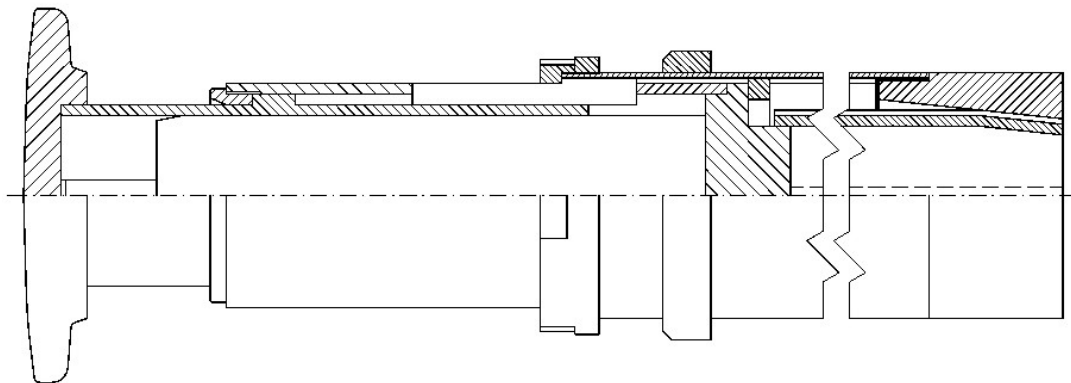
2000 kN. Zderzak posiada możliwość przenoszenia siły o wartości ponad 500 kN w zakresie odkształceń sprężystych. Nowy zderzak odznacza się z jednej strony relatywnie sztywną statyczną charakterystyką o skoku 150 mm zgodnie z kartą UIC 526-3 [11] lub o skoku 105 mm zgodnie z kartą UIC 526-1[10], co gwarantuje bardzo dobrą dynamikę wzdłużną pociągu. Z drugiej strony dynamiczne własności zderzaka pozwalają na znaczne zmniejszenie występujących przyspieszeń pojazdu, przy czym można to zrealizować przy skoku 350 mm.

- Kolejnym przykładem zastosowania nowego elementu zderzno-pochłaniającego jest lokomotywa typu TRAXX produkcji Bombardier Transportation produkowana dla DB AG i dostarczana do eksploatacji od stycznia 2005 [1]. Dla lepszego rozróżnienia nowa lokomotywa otrzymała nazwę BR185.2, jako wynik modernizacji lokomotywy BR185.1. Modernizacja polegała między innymi na dostosowaniu lokomotywy do wymagań współczesnych przepisów dotyczących bezpieczeństwa przed skutkami zderzeń. W celu wybrania optymalnego rozwiązania w zakresie urządzeń zderzno-pochłaniających uruchomiono dwa wewnętrzne projekty badawcze „MODULA” oraz „OCTEON”. W wyniku przeprowadzonych analiz wybrano ostatecznie kombinowany element DUPLEX G1.A.1, składający się z dwóch zespołów tzn. zespołu zderzaka (pełniącego funkcję zderzaka oraz elementu pochłaniającego energię typu „Crash”-oznaczenie G1-przystosowanego do odkształceń sprężystych oraz trwałych-z języka niemieckiego „reversible und irreversible Stufe”) oraz zespołu pochłaniającego A1 (konsola zderzaka zdolna do przejmowania energii, dodatkowy stopień odkształceń trwałych). Element ten wykazał się najlepszym współczynnikiem wyrażonym jako stosunek wysokiej zdolności przejmowania energii i relatywnie niskiej masy własnej.

Dane charakterystyczne elementu zderzno-pochłaniającego przedstawiają się następująco:

- całkowita długość zabudowy 1100 mm
- droga deformacji około 700 mm
- głębokość wprowadzenia do czołownicy 0.....170 mm
- możliwość przejmowania energii 1,7 MJ przypadającej na koniec wagonu
- masa własna 280 kg.

- Konstrukcję nowych elementów zderzno-pochłaniających podjęli również producenci krajowi np. Fabryka Urządzeń Mechanicznych



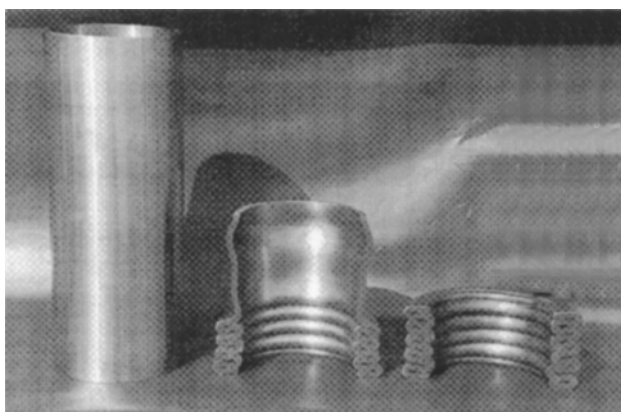
Rys.6. Zderzak dwustopniowy produkowany przez Fabrykę Urządzeń Mechanicznych KAMAX S.A. w Kańczudze

KAMAX S.A. w Kańczudze (rys.6) Zderzak dwustopniowy jest zbudowany na bazie zderzaka KX-ZC4 (kategoria C) i jest wyposażony w element typu CRASH. Dane charakterystyczne elementu zderzno-pochłaniającego przedstawiają się następująco:

- zdolność do przejmowania energii  $>0,4$  MJ
- poziom siły wyzwalającej element CRASH 1500 kN
- ugięcie (całkowita deformacja) 510 mm, z czego na zderzak przypada 105 mm natomiast na element CRASH 400 mm.

Zderzaki można stosować w wagonach nowobudowanych oraz w wagonach już eksploatowanych. Poziom siły wyzwalającej i siły deformacji, a więc i energii przejętej może być zmieniany w pewnych granicach zgodnie z wymaganiami klienta.

- Przykładem zastosowania nowego elementu zderzno-pochłaniającego jest konstrukcja firmy Alstom pokazana na rys.7. Całkowita deformacja plastyczna wynosi 350 mm osiągnięta przy prędkości 41.3 km/h.



stan nie zdeformowany      stan częściowo zdeformowany (wielkość deformacji 220 mm)      stan całkowicie zdeformowany (wielkość deformacji 350 mm)

Rys.7. Element przejmujący energię zderzenia konstrukcji firmy Alstom

#### 4. Podsumowanie

Jak wynika z przedstawionych przykładów dotyczących zwiększenia „pasywnego bezpieczeństwa” pojazdów szynowych przed skutkami zderzeń, ich nowoczesne konstrukcje spełniają najnowsze wymagania w tym zakresie. Jest to wynik istotnego postępu w zakresie inżynierii materiałowej oraz nowoczesnych metod konstruowania i obliczeń przy wykorzystaniu techniki wspomagania komputerowego. W artykule przedstawiono tylko wybrane konstrukcje, wprowadzone już do produkcji seryjnej np. elementy zderzno-pochłaniające, przeznaczone dla wagonów-cystern, spełniających przepisy karty UIC 573 [15]. Istotny postęp w zakresie przejmowania energii zderzenia można osiągnąć przez zastosowanie nowoczesnych materiałów o wysokiej granicy plastyczności  $R_{0.2}$  oraz dużej ciągliwości  $\epsilon$  (względemu wydłużeniu), przy zachowaniu jednak dobrej spawalności (zwłaszcza w przypadku stali). Bezpieczeństwo pasywne pojazdu szynowego, jako pojęcie stale rozwijające się, będzie w przyszłości definiowane przez coraz bardziej zwiększające się wymagania, którym muszą sprostać konstrukcje pojazdów szynowych i przejąć zwiększającą się energię zderzenia. Istniejące i wprowadzane do kart UIC nowe przepisy dotyczące budowy pojazdów szynowych będą podstawą do konstruowania elementów zderzno-pochłaniających. Istotnym czynnikiem skuteczności zwiększania pasywnego bezpieczeństwa pojazdów szynowych jest aspekt ekonomiczny, czyli koszty pojazdów szynowych spełniających nowe przepisy. Wskutek zwiększającej się konkurencji na rynku transportowym wprowadzanie nowych rozwiązań nie może być związane z gwałtownym zwiększeniem cen nowych pojazdów szynowych.

## Literatura

- [1] Löber M., Schneider S., Sifri N., Trotsch P.: *Innovative crashfähige Kastenstruktur der Traxx-Lokomotiven*. Elektrische Bahnen 8-9/2004.
- [2] Pietrzyk W.: *Połączenia w konstrukcji maszyn*. Politechnika Poznańska. Poznań 1978.
- [3] Sanecki H.: *Metodyka przygotowania pojazdów testowych do wysokoenergetycznych badań zderzeniowych kabin pojazdów szynowych*. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów. Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych. Politechnika Warszawska. Nr 2(61)/2006.
- [4] Schmidt M.: *Moderne Fahrwerksrahmen-Fertigung in Graz*. ZEV+DET Glasers Annalen Nr.123.09.1999.
- [5] Schneider S., Staub J.: *Kombiniertes Puffer- und Deformationselement für Schienenfahrzeuge*. ZEV+DET Glasers Annalen Nr. 124, 07.2000.
- [6] Wolter W.: *Kollisionssichere Eisenbahnfahrzeuge*. Eisenbahnfahrzeugbau. Schlussfolgerungen und Empfehlungen. Schienen der Welt, 05.2003.
- [7] Zehnder J.: *Über die Crash-Sicherheit von Aluminium-Wagenkästen*. ZEV+DET Glasers Annalen Nr.125, 9/10 2001.
- [8] Karta UIC 432: *Wagony towarowe. Prędkości jazdy. Warunki techniczne, które należy spełnić*. 10-te wydanie, sierpień 2005.
- [9] Karta UIC 505-1: *Pojazdy kolejowe. Skrajnia pojazdów*. 10-te wydanie z maja 2006.
- [10] Karta UIC 526-1: *Wagony towarowe. Zderzaki o skoku 105 mm*. 2-gie wydanie z 1.07.1998.
- [11] Karta 526-3. *Wagony towarowe. Zderzaki o skoku 130 i 150 mm*. 2-gie wydanie z 1.07.1998.
- [12] Karta UIC 528: *Urządzenia zderzakowe do wagonów pasażerskich*. 7-me wydanie z 1.01.1991 ze zmianą z 1.07.1995.
- [13] Karta UIC 529: *Wagony towarowe. Amortyzatory hydrodynamiczne o dużym skoku. Warunki techniczne*. 1-sze wydanie z 01.01.1978.
- [14] Karta UIC 566: *Obciążenie pudeł wagonów pasażerskich i ich części dobudowanych*. 3-cie wydanie z 1.01.1990 z uzupełnieniem z 1.07.1994.
- [15] Karta UIC 573: *Warunki techniczne dotyczące budowy wagonów-cystern*. 6-te wydanie, kwiecień 2005.
- [16] Karta UIC 660: *Przepisy dotyczące zapewnienia kompatybilności technicznej dla pociągów do stosowania dużych prędkości*. 2-gie wydanie z 08. 2002.
- [17] Karta UIC 827-2: *Warunki techniczne na dostawę pierścieni stalowych sprężyn zderzających*. 3 –cie wydanie z 1.01.1981 z uzupełnieniem z 1.04.1981.
- [18] PN-EN 10025-2:2005(U): *Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych-część 2: Warunki techniczne dostawy dla stali konstrukcyjnych niestopowych*.
- [19] PN-EN 10088-1:2005(U): *Stale odporne na korozję. Część 1: Wykaz stali odpornych na korozję*.
- [20] Alstom GmbH: *Präsentation eines Sicherheits-Chemiekesselwagens CeSa mit Crashversuchen*. ZEV+DET Glasers Annalen Nr.124/07.2000.
- [21] EST Eisenbahnsystemtechnik GmbH & Co.KG: *Crashpuffer*. ZEV+DET. Glasers Annalen Nr. 126/10.2002.
- [22] Schwab Verkehrstechnik AG ( Schaffhausen-Schweiz): *Neue Puffer*. Eisenbahntechnische Rundschau. 1/2005.
- [23] *Materiał reklamowy: Domex. Welding of cold forming steels*. SSAB Tunnpłåt AB.2001.
- [24] *Materiał reklamowy: High strength steels for higher payload on railway wagons*. SSAB Tunnpłåt AB. SSAB News nr 1 z 2001.
- [25] *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 automatycznego sprzęgu pracującego na rozciąganie i na ściskanie) i których wózki mają ramę stalową. ( Versuchsprogramm für Güterwagen mit Untergestell und Wagenkasten aus Stahl (die für den Einbau der Automatischen Zug-Druck Kupplung geeignet sind) und deren Drehgestelle mit stählernem Drehgestellrahmen)*. Utrecht , kwiecień 1997.
- [26] *Raport ORE/ERRI B205/Rp.1: Podstawowe wytyczne bezpieczeństwa przed zderzeniem pojazdów szynowych (Leitende Grundsätze der Aufprallsicherheit von Eisenbahnfahrzeugen)*. Utrecht 11/1994.
- [27] *Raport ORE/ERRI B106/Rp.20: Wytrzymałość na zderzenia pudła wagonu osobowego. Oddziaływania 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
- [28] *Raport ORE/ERRI B106/Rp.26: Numeryczna (dwuwymiarowa) symulacja zderzenia dwóch pociągów pasażerskich z porównaniem dwóch układów konstrukcyjnych*. Utrecht 1994.