

mgr inż. Szymon Finke
mgr inż. Julian Kominowski
mgr inż. Mateusz Motyl
Politechnika Poznańska

The effect of the bogie frame stiffness on running properties of rail vehicles

Wpływ sztywności ramy wózka na własności biegowie pojazdów szynowych

The most important part of a rail vehicle decisive for travel comfort and safety is its running gear. The bogie being an integral element plays a key role from the point of view of safe and stable vehicle motion on the rail infrastructure. The bogie frame structure adapted to the vehicle operational conditions can significantly improve its running properties. The article is devoted to analyzing some selected bogie frame designs with presentation of the structural differences between them.

Najważniejszym układem w pojeździe szynowym decydującym o jego komforcie i bezpieczeństwie jazdy jest układ biegowy. Wózek jako integralny element odgrywa podstawową rolę w bezpiecznym i stabilnym poruszaniu się pojazdu po infrastrukturze szynowej. Dopasowana konstrukcja ramy wózka do warunków eksploatacyjnych pojazdu, może w znacznym stopniu poprawić jego własności biegowe.

W artykule zostanie dokonana analiza wybranych konstrukcji ram wózków oraz przedstawione zostaną różnice strukturalne.

1. INTRODUCTION

The running gear of the rail vehicle ensures the proper vehicle-track interaction. A well thought out design of the gear affects the safety and dynamic properties of the vehicle on the track. The running gear of modern vehicles is usually designed as a two-axle bogie [10].

Before developing the concept of the bogies, the vehicle wheelsets were connected directly to the vehicle body. Such vehicles are called side-sill ones. This vehicle design contributes to smaller capacity (transport area, length, volume, etc.) of the wagon.

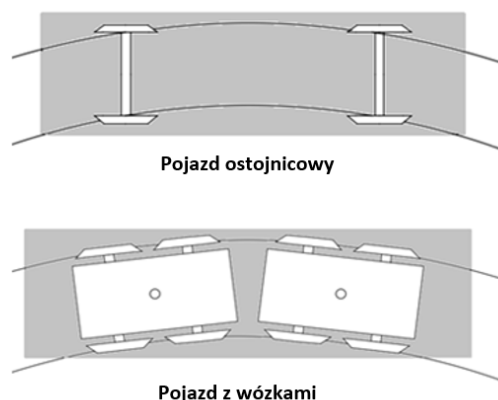
1. WSTĘP

Układ biegowy pojazdu szynowego zapewnia właściwą współpracę pojazdu z torem. Przemyślany projekt układu wpływa na bezpieczeństwo i dynamikę pojazdu na torze. We współczesnych pojazdach układ jezdny wykonywany jest zwykle w postaci wózka dwuosioowego [1].

Przed opracowaniem koncepcji wózków, budowane były pojazdy z zestawami kołowymi podłączonymi bezpośrednio do nadwozia. Pojazdy nazywane są pojazdami ostojnicowymi. Taki typ pojazdu, ze względu na swoją konstrukcję, posiada mniejszą

Moreover, such a vehicle usually exerts greater maximum force on the track (especially round the curves) than a bogie vehicle.

The bogies provide better suspension of the vehicle [4], since they ensure several spring suspension stages. Another quality of the bogie vehicle consists in its ability to pass the track curves of smaller radii than the bogieless vehicles, that is particularly important on the sidings and trans-shipment yards. The former standard of RIV vehicles (Italian Regolamento Internazionale dei Veicoli) required 9-meters maximum distance between the axles of a bogieless vehicle [10], due to the limitation related to minimum curve radius. The problems with driving of bogieless vehicles around the curves arise also due to significantly greater wheel-rail striking angle as compared to the bogie vehicles. It is shown in Fig. 1 [8]



Driving round the curve increases wear of the wheels and rails [1, 4, 8]. Another disadvantage of the side-sill vehicles consists in uneven vertical load of the vehicle exerted on the track. In case of a two-, three- or multi-axial bogie the displacements caused by vertical track unevenness are transferred to the body only partially, since the bogie generates an additional degree of freedom of the structure.

In case of a side-sill vehicle the track unevenness is to a greater extent transferred to the body, as shown in Fig. 2.

The bogies have a secondary suspension allowing for better body suspension on the wheelsets. Multistage suspension enables more accurate selection of the parameters of the primary suspension with a view to improve the axle-guidance, while the secondary suspension may reduce the body vibration. The bogies of modern rail vehicles are considered as their integral parts, significantly affecting running quality and safety [4].

The European legislation related to the railway interoperability considers a bogie as an element of the subsystem interoperability. The bogie testing to

pojemność (powierzchnie transportową, długość, objętość itp.), a ponadto wywierają często na tor większą maksymalną siłę (szczególnie na łukach), niż pojazd z zastosowanym wózkiem.

Zastosowanie wózków w pojazdach szynowych pozwala na lepszy projektowanie usprężynowania pojazdu [2], ponieważ umożliwia na wykorzystanie kilku stopni usprężynowania. Kolejną cechą pojazdu wózkowego, jest możliwość pokonywania łuków infrastruktury o mniejszych promieniach, w porównaniu do pojazdów bezwózkowych. Cecha szczególnie istotna na bocznicach czy placach przeładunkowych. Stosowany dawniej standard pojazdów towarowych RIV (wł. *Regolamento Internazionale dei Veicoli*), ze względu na ograniczenie o minimalnym promieniu łuku, maksymalną odległość między osiami w pojeździe bez wózka określał na 9 metrów [1]. Problemy z jazdą w łuku pojazdów bezwózkowych wynikają również ze znacząco większego kąta natarcia koła na szynę w łuku, niż ma to miejsce w pojazdach z wózkami. Pokazano to na rysunku 1 [3].

Jazda w łuku powoduje również większe zużycie kół i szyn [2, 3, 4]. Inną wadą pojazdów ostojnicowych jest nierównomierność obciążenia pionowego pojazdu na tor. W przypadku wózka dwu, trzy lub wieloosiowego przemieszczenia wynikające z pionowych nierówności toru przenoszone są do nadwozia tylko częściowo, ponieważ wózek daje konstrukcji dodatkowy stopień swobody. W przypadku pojazdu ostojnicowego znacznie większa część nierówności jest przenoszona na nadwozie, co pokazano na rysunku 2.

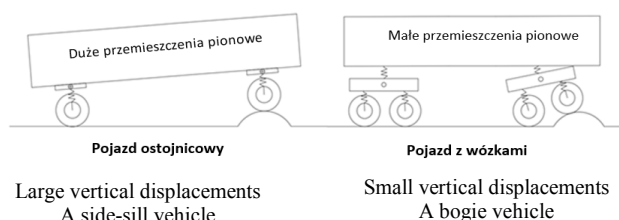


Fig. 2. The vehicle displacements caused by track vertical unevenness in case of side-sill and bogie vehicles

Rys. 2. Przemieszczenia na nierównościach pionowych toru pojazdu ostojnicowego oraz wózkowego

Wykorzystanie wózka w układach biegowych pozwala na zastosowanie drugiego stopnia usprężynowania, który umożliwia na lepsze odseparowanie drgań zestawach kołowych od nadwozia pojazdu. Wielostopniowe usprężynowanie pozwala na dokładniejszy dobór parametrów pierwszego stopnia usprężynowania uwzględniając głównie prowadzenie zestawu kołowego, a dobór parametrów drugiego stopnia usprężynowania polega na zmniejszeniu drgań działających na nadwozie pojazdu. W nowoczesnych pojazdach szynowych wózki traktowane są jako ich integralna część, a także mają znaczący wpływ na jakość i bezpieczeństwo jazdy [2].

be carried out before putting it into service makes an essential part of the process of issuance of the vehicle permit. From a technical point of view, the bogie characteristics directly translate into the criteria for assessing the vehicle running quality.

Among the main purposes of a railway bogie there are: [1, 4, 11]:

- uniform distribution of the vehicle weight among the wheelsets;
- transmission of longitudinal forces between the wheelsets and the bogie frame and between the bogie frame and the body. These forces arise mainly while accelerating and braking. The construction should enable full use of the wheel – rail adhesion in order to convert the wheel rotation into linear motion of the vehicle;
- transferring the bogie guiding force arising on a straight track and round the curves, provided the driving safety conditions are kept.
- keeping stability and limited values of vertical and transverse forces adversely affecting the track.

The vehicle design should be scanned from many points of view. A modern bogie design should meet the following main requirements [4]:

- low weight;
- high reliability and durability, significantly affecting the cost of the bogie life cycle (LCC - life cycle cost);
- replacement of the components having unstable characteristics allows to obtain more exhaustive vehicle characteristics (replacing of friction absorbers to hydraulic dampers);
- strength of the bogie frame depends on the condition of the track where the vehicle is being operated.

2. THE BOGIE PARAMETERS

The rail vehicle bogies should be designed in accordance with the conceptual design of the vehicle. It means that for proper course of the designing process the bogie designers must take into account the following vehicle features [4, 14]:

- the vehicle type (tram, locomotive, wagon, multiple-unit set, etc.);
- the track gauge where the vehicle shall be operated;
- the track structure gauge where the vehicle shall be operated;
- uniform vehicle weight distribution;
- vehicle stability;
- passenger comfort;
- maximum vehicle speed;
- the minimum radius of the track curvature.

W europejskim prawodawstwie dotyczącym interoperacyjności kolei, wózek jest zdefiniowany jako składnik interoperacyjności podsystemu. Proces jego badania, przed dopuszczeniem do eksploatacji, jest istotną częścią procesu dopuszczenia całego pojazdu do ruchu. Z technicznego punktu widzenia cechy wózka przekładają się bezpośrednio na wartości kryteriów oceny jakości biegu pojazdu.

Do głównych zadań wózka kolejowego można zaliczyć: [2, 4, 5]:

- równomierne rozłożenie masy pojazdu na zestawy kołowe,
- przenoszenie sił wzdłużnych pomiędzy zestawami kołowymi i ramą wózka oraz między ramą wózka a nadwoziem. Siły te powstają głównie podczas przyspieszania i hamowania. Konstrukcja powinna umożliwiać pełne wykorzystanie przyczepności kół i szyn w celu zamiany ruchu obrotowego kół na ruch liniowy pojazdu,
- przenoszenie siły prowadzącej wózka na prostym torze i łukach z zachowaniem warunków bezpieczeństwa jazdy.
- uzyskanie stabilności i ograniczonych sił pionowych i poprzecznych wpływających niekorzystnie na tor,

Konstrukcje pojazdów szynowych muszą być analizowane pod wieloma względami, a nowoczesny projekt wózka powinien spełniać główne wymagania [2]:

- mała masa własna,
- wysoka niezawodność i trwałość, które znacząco wpływają na koszt cyklu życia wózka (LCC - koszt cyklu życia),
- wymiana elementów bez stabilnej charakterystyki pozwala na uzyskanie pełniejszych charakterystyk pojazdów (konwersja tłumików ciernych na tłumiki hydrauliczne),
- wytrzymałość ram wózków uzależniona od stanu toru, na którym porusza się pojazd.

2. PARAMETRY WÓZKA

Wózki do pojazdów szynowych powinny być zaprojektowane zgodnie z założeniami projektowymi pojazdu. Oznacza to, że projektanci wózków muszą brać pod uwagę cechy pojazdów w procesie projektowania. Konstruktor musi wymagać takich cech projektu jak [2, 6]:

- rodzaj pojazdu (tramwaj, lokomotywa, wagon, jednostka trakcyjna itp.),
- szerokość toru po którym pojazd ma się poruszać,
- skrajnia toru po którym pojazd ma się poruszać,
- równy rozkład masy pojazdu
- stabilność pojazdu,
- komfort pasażera,
- maksymalna prędkość pojazdu,

The above aspects are chosen by the designers depending on the vehicle design. What's more, the vehicle should also be designed according to the standards and guidelines for the user, keeping, at the same time, the travel safety and comfort. The bogie parts to be considered are [1, 4]:

- the number of wheelsets;
- the type of wheelsets;
- the axle-guidance method;
- mutual guidance of the wheelsets round the curve;
- the way of power transmission between the bogie and vehicle body;
- the choice of elements of the primary and secondary suspensions;
- type of the bogie-vehicle body guidance.

The bogie should be considered as a mechanism. The bogie frame is its main part and, therefore, it should serve as a support for some bogie components [1, 6]:

- power transmission system;
- braking system;
- greasing system of the wheel flanges;
- wheel anti-slip system;
- sand distributors;
- diagnostic system.

The choice of the bogie elements impacts the shape of its frame. Some of these elements are crucial, since they may affect the bogie frame topology. These include the suspension, power transmission system, braking system, axle-guidance and the way of longitudinal force transmission. On the other hand, the elements such as the lubrication, anti-slip, sand distribution or diagnostic systems only slightly affect the frame structure, as they contribute only to insignificant stress increase in the frame. At the same time, their fastening impose only small changes in the frame shape.

It is difficult to specify all the design options of the bogie frame, as there is a wide range of its solutions, for example related only the power transmission system.

Possible variants of the bogie parameters are presented in Table 1.

All possible parts of the bogie structure are individually chosen, in consequence of diversified specifics of each of the bogies.

The list of the Table 1 shows that there are many parameters to be taken into account while designing a bogie. The bogie frame construction is a result of the designer's choice of bogie parameters.

The EN 13749 Standard presents classification of the bogies [15]:

- B-I category bogies designed for the stock operating on standard tracks and for city passenger stock, inclusive of high speed and TGV vehicles, motor and trailed vehicles;

- minimalny promień łuku pojazdu.

Powyższe aspekty wybierane są przez projektantów w odniesieniu do projektu pojazdu. Co więcej powinien być zaprojektowany także zgodnie ze standardami i wytycznymi dla użytkownika, przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa i komfortu jazdy. Elementy wózka, które należy uwzględnić, to [2, 4]:

- liczby zestawów kołowych,
- rodzaj zestawów kołowych,
- sposób prowadzenia zestawów kołowych,
- wzajemne prowadzenie zestawów kołowych w łuku,
- sposób przeniesienia mocy między wózkiem a nadwoziem,
- dobór elementów pierwszego i drugiego stopnia usprężynowania,
- rodzaj prowadzenia wózka względem nadwozia.

Wózek należy traktować jako mechanizmem. Rama wózka stanowi główną część tego mechanizmu, powinna zatem wspierać część komponentów wózka [4,7]:

- układ napędowy,
- układ hamulcowy,
- układ smarowania obrzeży koła,
- układ antypoślizgowy kół,
- piasecznice,
- układ diagnostyczny.

Wybór elementów układu wózka ma wpływ na kształt jego ramy, a niektóre z nich mają kluczowe znaczenie, ponieważ mogą zmienić topologię konstrukcji ramy wózka. Można do nich zaliczyć usprężynowanie, układ napędowy, układ hamulcowy, prowadzenie zestawów kołowych i sposób przeniesienia siły wzdłużnej. Ponadto elementy takie jak układ smarowania, układ przeciwpoślizgowy, układ rozprowadzania piasku czy układ diagnostyczny, mają niewielki wpływ na konstrukcję ramy, gdyż nie powodują dużego wzrostu naprężenia w ramie, a elementy potrzebne do ich zamontowania nieznacznie zmieniają kształt.

Trudność scharakteryzowania wszystkich wariantów konstrukcyjnych ramy wózka, polega na szerokim zakresie rozwiązań, choćby dla układów napędowych.

Możliwe warianty parametrów wózka przedstawiono w tablicy 1.

Dobór elementów, które można znaleźć w strukturze wózka, prowadzony jest indywidualnie. Wynika to z różnorodnej specyfiki wózków w zależności np. od zadań jakie ma realizować.

Zestawienie w tablicy nr 1 pokazuje, że istnieje wiele parametrów, które należy brać pod uwagę w procesie projektowania wózków. Konstrukcja ramy wózka jest wynikiem wyborów parametrów wózka dokonanych przez konstruktora.

Table 1. Possible variants of the bogie specification [1, 4, 7, 13]

Item	Parameter	Value
1.	The frame type	The end of the frame: open or closed. Frame position with regard to the wheels inner, outer or double-sided. Special frame types: three-part frame, portal frame, etc.
2.	Types of the wheels	The types: wheel set, independent wheels, partly independent wheels, etc.
3.	Guidance of the wheels	Swing arm, column, fork lift, drawbar, Alsthom, etc.
4.	Guidance between the wheels	rigid [11], flexible [11], diagonal [11], controlled by vehicle body, etc.
5.	Longitudinal guidance	Watt linkage, underframe pivot, bearing flange, beamless traction rod, bogie bolster, etc.
6.	Primary suspension	Spring: - Shape: conical, chevron; - Type: coil, laminated; - Material: metal-rubber, rubber, metal, composite. Damper: - type: viscous, friction, active suspension. - position: vertical, horizontal; Bumper: - position: vertical, horizontal; - shape: cuboid, parabolic.
7.	Secondary suspension	Spring: - Shape: conical, straight, - Type: coil, laminated, pneumatic, flexicoil. - Material: metal-rubber, rubber, metal, composite. Damper: - type: viscous, friction, active suspension. - position: vertical, horizontal; Bumper: - position: vertical, horizontal; - shape: cuboid, parabolic.
8.	Power transmission	Cardan shaft, nose suspended traction motor, the traction motor suspended on the bogie frame, the gears, etc.
9.	Braking system	Type: Brake disc, friction brake blocks etc. Friction surface: wheels, axle-mounted disc, wheel-mounted disc.
10.	Greasing system of wheel flanges	Many types
11.	Wheel anti-slip system	Many types
12.	Sand distributors	Many types
13.	Diagnostic system	Many types

- B-II category bogies designed for inner and outer suburban passenger vehicles, motor and trailed ones;
- B-III category bogies designed for underground and rapid transit stock, energized and non-energized;
- B-IV category bogies designed for limited-load rail vehicles and trams;
- B-V category bogies designed for freight cars with single-stage suspension;
- B-VI category bogies designed for freight cars with double-stage suspension;
- B-VII category bogies designed for the locomotives.

Tab. 1. Możliwe warianty specyfikacji wózka [2, 4, 8, 9, 13, 14, 15]

L. p.	Parametr	Wartość
1.	Typ ramy	Zakończenie ramy: otwarta lub zamknięta. Pozycja ramy względem kół wewnętrzna, zewnętrzna lub obustronna. Specjalne typy ramy: trzyczęściowa, rama portalowa itd.
2.	Typy kół	Typy: zestaw kołowy, koła niezależne, częściowo niezależne itp.
3.	Prowadzenie kół	wahacz, kolumnowe, widłowe, cięglowe, połączenie Alsthoma, etc.
4.	Prowadzenie pomiędzy kołami	szttywne, elastyczne, diagonalne, sterowane nadwoziem etc.
5.	Prowadzenie wzdłużne	Połączenie Watta, czop skrętu, wieniec łożyskowy, ciężło trakcyjne. bezbelkowe, belka bujakowa itd.
6.	Usprężynowanie I stopnia	Sprężyna: - Kształt: stożkowy, szewron; - Typ: śrubowa, piórowa; - Materiał: metal-guma, guma, metal, kompozyt. Tłumik: - typ: wiskotyczny, ciemny, aktywne zawieszenie. - pozycja: pionowa, pozioma; Zderzak: - Pozycja: pionowa, pozioma; - Kształt: kuboidalny, paraboliczny.
7.	II stopień usprężynowania	Sprężyna: - Kształt: stożkowy, prosty, - Typ: śrubowa, piórowa, pneumatyczna, flexicoil. - Materiał: metal-guma, guma, metal, kompozyt. Tłumik: - typ: wiskotyczny, ciemny, aktywne zawieszenie. - pozycja: pionowa, pozioma; Zderzak: - Pozycja: pionowa, pozioma; - Kształt: kuboidalny, paraboliczny.
8.	Układ napędowy	Wał kardana, silnik trakcyjny zawieszony „za nos”, silnik trakcyjny zawieszony na ramie wózka, przekładnie itd.
9.	Układ hamulcowy	Typ: Tarcza hamulcowa, klocki cierne itd. Powierzchnia tarcia: koła, tarcza na osi, tarcza na kole.
10.	System smarowanie obrzeży koła	Wiele rodzajów
11.	System antypoślizgowy	Wiele rodzajów
12.	Piasecznice	Wiele rodzajów
13.	System diagnostyczny	Wiele rodzajów

W normie EN 13749 można znaleźć klasyfikację wózków [10]:

- Wózki kategorii B-I dla taboru szlakowego i śródmiejskiego taboru pasażerskiego, w tym pojazdów o dużej i bardzo dużej prędkości, napędzanych i nie napędzanych,
- Wózki jezdne kategorii B-II do wewnętrznych i zewnętrznych podmiejskich pojazdów pasażerskich, napędzanych i nie napędzanych,
- Wózki kategorii B-III do taboru metra i taboru szybkiego transportu, zasilanych i nie zasilanych,

3. TYPES OF THE BOOGIE FRAMES OF RAIL VEHICLES

The frame is the main part of the bogie. It is an intermediate element between the wheelset and the body. The frame is usually elastically suspended on the wheelsets, while the vehicle body is most often suspended on it via the secondary suspension.

The type of the bogie frame significantly affects the strength of the structural elements of the vehicle. The strength tests are carried out with consideration of the forces acting on the vehicle that result from its dynamic load caused by vehicle interaction with the track and the forces resulting from the braking and traction systems (provided they are bogie mounted) [15]. The bogie frame design depends also on the production technology and its subsequent operation (the type of its linkage with the vehicle body, bogie suspension stages, etc.).

The bogie frames of a rail vehicle can be classified with regard to:

- the type of connection to the vehicle body (e.g. rigid, flexible or with a free beam);
- production technology (e.g. welded, casted, riveted, etc.);
- frame position with respect to the wheels (e.g. internal or external);
- the design of the elements it is made of (e.g. box construction, tubular profiles, flat profiles, etc.);
- the design type (e.g. open frame, singly or doubly closed, etc.);
- occurrence of the headstock;
- shape of the frame area (flat or spatial) [4, 7].

The bogie frame structure may also be classified with regard to occurrence of a free-beam: with or without the free-beam [3]. The bogies equipped with a free-beam can be divided into:

- a bogie provided with a bogie bolster;
- a bogie provided with a free-beam with secondary suspension located above the beam;
- a bogie provided with a free-beam with secondary suspension located below the beam.

An interesting construction is the Jacobs bogie. In this case two neighbouring vehicle bodies rest on a single bogie frame. This allows to reduce the number of the bogies of the whole vehicle. Nevertheless, such a solution shortens the length of the vehicle unit by the space that in the classic system is located between the front of the unit and the bogie [6].

4. STIFFNESS OF THE TROLLEY FRAME AS AN IMPORTANT STRUCTURAL PARAMETER

The bogie frames of older types were distinguished by high stiffness. Such a design was due to the need to extinguish the excitations of the system caused mainly by the suspension. The change to more flexible bogie frame design caused that the frame

- Wózki kategorii B-IV do lekkich pojazdów szynowych i tramwajów,
- Wózki typu B-V do taboru towarowego z jednostopniowymi usprężynowaniem,
- Wózki typu B-VI do taboru towarowego z dwustopniowymi usprężynowaniem,
- Wózki jezdne kategorii B-VII do lokomotyw.

4. SZTYWNOŚĆ RAMY WÓZKA JAKO ISTOTNY PARAMETR KONSTRUKCJI

Ramy wózka w starszych typach pojazdów cechowały się dużą sztywnością. Podstawą tego rozwiązania była potrzeba wygaszania każdego wzbudzenia układu musiało w głównym stopniu poprzez elementy usprężynowania. Zmiana konstrukcji ramy wózka na bardziej podatną spowodowała częściowe przejście tego zadania przez podatność samej ramy.

W procesie doboru parametrów usprężynowania pojazdu szynowego najważniejszymi kryteriami jest uzyskanie stabilności jazdy i wysokiego komfortu. Najistotniejsze są dwa parametry usprężynowania. Pierwszym z nich jest sprężystość. Związana jest ona z elementami sprężystymi takimi jak sprężyny piórowe, śrubowe czy miechy pneumatyczne. Zapewniają one progresywną siłę oporu, która rośnie wraz z ugięciem sprężyny. Drugi parametr to tłumienność, który w układach usprężynowania uzyskiwany jest poprzez elementy nazywane tłumikami. Odpowiedzialne są one za pochłanianie energii drgań zawieszania, a siła oporu zależna jest od prędkości ugięcia. Należy pamiętać, że sprężyny posiadają wewnętrzną tłumienność. Dla przykładu w sprężynach śrubowych jest pomijalnie mała, a w sprężynach piórowych jest na tyle duża, że w niektórych wózkach stanowi jedyny element tłumiący. Tłumiki posiadają wewnętrzną sprężystość, lecz w wielu modelach z racji niewielkiej wartości jest ona pomijana.

Wózek musi być zaprojektowany z uwzględnieniem normy EN 13749 [10, 16]. Norma uwzględnia obciążenia powodowane przez:

- ciężar pojazdu, w tym jego ładunek,
- przemieszczanie ładunku,
- nierówności toru,
- jazdę w łukach,
- przyspieszenie i hamowanie,
- załadunek (wagonów towarowych),
- drobne wykolejenia,
- pracę zderzaków,
- ekstremalne warunki środowiskowe,
- warunki awarii (np. moment obrotowy zwarcia silnika),
- sytuacje konserwacji / utrzymania (np. podnośzenie i unoszenie pojazdu).

Spośród nich można wyróżnić nierówności toru, a szczególnie wichrowatości toru. Inne siły przykładowe do ramy wózka, które należy poddać analizie to:

- siły bezwładności wynikające z mas przyczepionych do ramy wózka,

flexibility partially fulfilled the role of vibration damping.

The most important criteria for selecting the parameters of the rail vehicle suspension are running stability and high comfort. The most meaningful are two parameters. The first one is elasticity. It is caused by the elastic elements such as laminated springs, coil springs and air bellows. They provide a progressive resistance force, increasing with deflection of the elastic element. The other parameter is attenuation, ensured in the suspension systems by the dampers. They absorb the energy of suspension vibration. The force exerted by the damper depends on the speed of deflection. It should be noticed that the springs have their own damping properties. In case of the coil springs it is negligibly small, while in the laminated springs it is so large that in some bogie types they are the only damping elements. The dampers have also their own elasticity, nonetheless, it is usually ignored due to its small value.

The bogie must be designed with consideration of the EN 13749 standard [15]. The standard takes into account the loads caused by:

- the weight of the vehicle, inclusive of its load;
- relocation of the cargo;
- track unevenness;
- running at track curve;
- acceleration and braking;
- loading (of the freight wagons);
- minor derailments;
- bumper work;
- extreme environmental conditions;
- failure conditions (e.g. short-circuit torque of the engine);
- maintenance situations (e.g. lifting of the vehicle).

Among them, unevenness of the track can be mentioned, with special emphasis put on track distortion. The other forces acting on the bogie frame that should be considered are:

- inertial forces due to the masses attached to the bogie frame;
- inertial forces due to the masses attached to the axle-bearing (non-suspended mass);
- dynamic forces caused by operation of the dampers;
- dynamic forces caused by operation of the braking system;
- dynamic forces caused by operation of the traction motor;
- dynamic forces caused by operation of the vehicle body tilting system [14].

While designing the bogie frame it is not decided whether the change in the suspension characteristics affects it (since during the tests only the force transmitted through the damper is considered).

- siły bezwładności spowodowane masami przy-mocowanymi do maźnicy (masa nieresorowana),
- siły dynamiczne wynikające z pracy tłumików,
- siły dynamiczne wynikające z pracy układu hamulcowego,
- siły dynamiczne wynikające z pracy silnika trakcyjnego,
- siły dynamiczne wynikające z pracy systemu wychylnego pudła [6,10].

Podczas procesu projektowania nie analizuje się, czy zmiana charakterystyki zawieszenia ma wpływ na ramę wózka (podczas testów uwzględnia się tylko siła przenoszona przez tłumik).

Zwichrowany tor znacznie obciąża sztywne ramy wózka. Ramy podatne dostosowują się do wichrowatości toru. Oznacza to, iż występują konstrukcje ramy wózka, które są odporne na obciążenia spowodowane wichrowatością. Rama wózka są obecnie opracowywane w celu wykorzystania ich podatności, aby zapewnić lepszą warunki biegowe na torze kolejowym.

Nowoczesne ramy wózków są bardziej elastyczne, niż starsze konstrukcje. Przykładem są konstrukcje pozbawione czołownic. Dzisiaj stają się one standardem.

Ramy tego typu wymagają jednak właściwego zaprojektowania, aby w węzły w miejscach, gdzie dochodzi do największych odkształceń, spełnione były warunki wytrzymałościowe i zmęczeniowe. Przykład podatnej ramy wózka lokomotywy na tor zwichrowany jest rozwiązanie pokazane na rysunku 3.

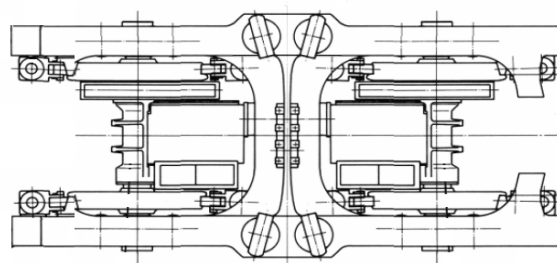
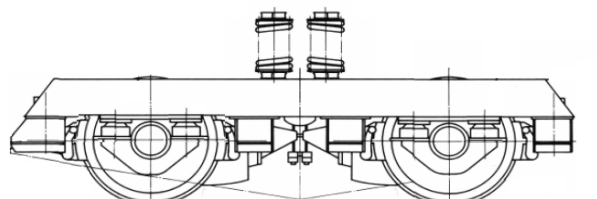


Fig. 3. Design of a locomotive bogie frame adapted to a distorted track

Rys. 3. Konstrukcja ramy wózka lokomotywy podatnej na tor wichrowaty

Distorted track induces significant forces acting on rigid bogie. On the other hand, the flexible bogie frames are able to adapt to a distorted track. It means that some bogie frame designs are resistant to distorted track. At present such bogie frames are being developed the flexibility of which may provide better running conditions on the railway track.

Modern bogie frames are more flexible than the older constructions. As an example the constructions without headstocks might be mentioned. To-day they are becoming a standard.

However, the frames of this type should be properly designed, with a view to meet the stress and fatigue conditions in the locations of the greatest deformations. An example of a locomotive bogie frame adapted to a distorted track is shown in Figure 3.

The bogie frame is provided with a very flexible cross-bar, that enables the vehicle to run up to 120 km/h on a track of allowable distortion.

The vehicle with the elastic axle-guidance is susceptible to hunting and even to hunting oscillation that may arise at various levels in the whole object. In case of a bogie, the critical speed at which the oscillation starts, is limited by two factors:

- shear stiffness or resistance to relative lateral displacement of the axis,
- bending stiffness or resistance to relative deviation between two wheelsets.

More rigid suspension springs of the primary suspension result in better stability of the bogie motion. In consequence, it may run faster before reaching its critical speed.

This can be explained in a more practical way: each wheelset, in order to suppress the hunting, must be so fixed as to become resistant to deviation and lateral motion with regard to the bogie frame.

On the other hand, while running round a curve, the requirements for the wheelsets are exactly the opposite. Low torsional stiffness is required at small revolutions of the wheelset, so as to enable easy rotation of the axles with a view to accommodate to the curve and low lateral stiffness, to allow for easy motion of the axles from one side to another on the curve or unevenness of the track. Such a flexibility is important since in each vehicle several various instability types may occur, each of them arising at various critical speeds.

The analysis of these phenomena is necessary in order to find a compromise between the running stability on a straight track and flexibility improving the running conditions round the curve and on uneven track. Such analyses require both the use of computer simulation packages and their validation in field conditions.

Physical models adopted in these analyses should take into account both the elastic and damping

Pokazana rama wózka ma bardzo elastyczną belkę poprzeczną, dzięki której pojazd może poruszać się z prędkością do 120 km/h po torze o dopuszczalnej wichrowatości.

Pojazd ze sprężystym prowadzeniem zestawu kołowego podatny jest na wężykowanie, a nawet oscylacje wężykowania, które mogą występować na różnych poziomach w całym zespole. W przypadku wózka prędkość krytyczna, przy której rozpoczynają się oscylacje, ograniczona jest przez dwa czynniki:

- sztywność na ścinanie lub odporność na względne boczne przemieszczenie osi,
- sztywność zginania lub odporność na względne odchylenie między dwoma zestawami kołowymi.

Bardziej sztywne sprężyny usprężynowania pierwszego stopnia powodują większą stabilność podczas ruchu wózka i dzięki czemu będzie on jechał szybciej, zanim osiągnie swoją prędkość krytyczną.

Można to zinterpretować w bardziej praktyczny sposób: dla powstrzymania wężykowania, każdy zestaw kołowy musi być tak unieruchomiony, aby nie był podatny na odchylenie i na ruch boczny względem ramy wózka.

Podczas jazdy w łuku wymagania dotyczące sztywności usprężynowania są odwrotnie. Podatność skrotna usprężynowania przy niewielkich obrotach zestawu kołowego, pozwala na obrót zestawu kołowego co ułatwia dostosowanie się pojazdu do łuku. Dodatkowo mniejsza sztywności usprężynowania I stopnia, pozwala na przemieszczenie wzdłużne zestawu kołowego co zmniejsza zużycie podczas przejazdu przez łuk toru oraz lepsze pokonywanie nierówności poprzecznych toru. Podatność ta jest ważna, ponieważ każdy pojazd szynowy może mieć kilka różnych rodzajów niestabilności, z których każdy powstaje przy innej krytycznej prędkości.

Analiza tych zjawisk jest niezbędna, aby znaleźć możliwy kompromis pomiędzy stabilnością jazdy po torze prostym, a podatnością poprawiającą warunki ruchu podczas jazdy w łuku oraz na nierównościach toru. Analizy takie wymagają zarówno wykorzystanie pakietów symulacji komputerowych, jak i ich walidacji w warunkach poligonowych.

Modele fizyczne przyjęte w tego typu takich analizach powinny uwzględniać zarówno elementy sprężyste i tłumiące jak i wewnętrzną tłumienność i sprężystość samej ramy wózka [17].

5. WNIOSKI

Wózki są integralną częścią nowoczesnych pojazdów szynowych wszystkich typów. Ich głównym elementem konstrukcyjnym są ramy. Struktura ramy wózka zależy od wielu czynników. Konstrukcja ramy wózka ma wpływ na właściwości biegu pojazdu.

elements as well as the internal attenuation and elasticity of the bogie frame itself.

5. CONCLUSIONS

The bogie is an integral part of modern rail vehicle of any type. The main structural element of the bogie is its frame. The structure of the bogie frame depends on many factors. The construction of the bogie frame affects running properties of the vehicle.

The effect of many factors shaping the frame structure impedes to create a uniform concept of the bogie frame. Nevertheless, some design parameters may be distinguished that affect the shape of the bogie frame, e.g. the type of the primary and secondary suspension, axle-guidance, the way of transmission of longitudinal forces etc.

Stiffness of the bogie frame has an impact on the bogie and the behavior of the entire vehicle. Consideration of the bogie frame stiffness allows better to design the vehicle suspension. On the other hand, the account of influence of the suspension elements on the bogie frame allows to develop a more accurate model, enabling such shaping of the bogie as to reduce its weight.

The correlation between the frame shape and the bogie elastic and damping elements allows to develop a vehicle adapted to low-quality tracks (of significant unevenness).

However, it should be noticed that such an approach is caused by poor condition of the infrastructure. Meanwhile, in longer term perspective the improvement of the infrastructure quality instead of designing the vehicles able to run on unacceptable tracks is more cost-effective. Such vehicles would run with limited speed and, at the same time, the forces arising at the wheel-rail interface would cause significant wear both of the rolling stock and the infrastructure.

Ze względu na wpływ wielu czynników kształtujących konstrukcję ramy wózka, trudno jest stworzyć koncepcję ram wózków. Jednak możliwe jest wyodrębnienie parametru konstrukcyjnych mających wpływ na kształt ramy wózka takich jak rodzaj usprężynowania I i II stopnia, prowadzenie zestawu kołowego, sposób przeniesienia sił wzdłużnych oraz inne.

Sztywność ramy wózka jest parametrem wpływającym na zachowanie wózka ja o całego pojazdu. Uwzględnianie sztywności ramy wózków w analizach pozwala na lepsze zaprojektowanie zawieszenia pojazdu. W drugą stronę uwzględnienie wpływu elementów zawieszenia na ramę wózka pozwala na otrzymaniu dokładniejszego modelu, co powoli na taki jej kształtowanie aby zmniejszeniu uległa jej masa własna.

Dobór kształtu ramy oraz elementów sprężystych i tłumiących w wzajemnej korelacji pozwala na tworzenie pojazdu na tory o niskiej jakości (z znacznym nierównościami).

Należy jednak pamiętać, że takie działania są odpowiedzią na zły stan infrastruktury i w dłuższym okresie czasu bardziej opłacalne będzie poprawa stanu infrastruktury, a nie budowa pojazdów mogących się poruszać po torach o niedopuszczalnej jakości. Pojazdy będą się poruszać po niej z ograniczoną prędkością, a siły powstające na styku koła z szyną toru będą generować znaczne zużycia zarówno taboru, jak i infrastruktury.

Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego nr 05/52/DSMK/0286 oraz P05/52/DSPB/0277, finansowanego ze środków Wydziału Inżynierii Transportu Politechniki Poznańskiej.

Bibliography / Bibliografia

- [1] Andersson E., Berg M., Stichel S., (2014) *Rail Vehicle Dynamics*, Centre of Research and Education in Railway Engineering, Railway Group KTH, Sztokholm.
- [2] Claus, H., Schielen, W., *Modeling and simulation of railway bogie structural vibrations*
- [3] *Coupled single-axle running gears - new radial steering design Development of Shinkansen Bogies for Speed Increases*
- [4] Gąsowski W. (1988), *Wagony kolejowe Konstrukcja i badania*, Wydawnictwo Komunikacji i łączności, Warszawa.
- [5] Grote, K. H., Antonsson, E. K. (2009). *Springer handbook of mechanical engineering (Vol. 10)*, Springer Science & Business Media, s. 1025-1026.
- [6] Hecht, M., (2001), *European freight vehicle running gear: today's position and future demands*,
- [7] Kortüm, W., Jaschinski A *mechatronic developments for railway vehicles of the future*
- [8] Okamoto I. (1998), *How bogies work*, Railway, Technology Today, 5.
- [9] Orlova, A and Boronenko, Y (2006) *The anatomy of railway vehicle running gear*. In Iwnicki, S (editor), *Handbook of railway vehicle dynamics*, Boca Raton: CRC Press, s.39-83
- [10] Podamski, J., Marczewski R. (1980), *Wózki wagonowe*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- [11] Romaniszyn, Z. (2005), *Podwozia wózkowe pojazdów szynowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- [12] Sobaś, M., (2014), *Zawieszenie i układy biegowe wagonów towarowych*, Instytut Pojazdów Szynowych „Tabor”, Poznań
- [13] Spiryagin M., Wolfs P., Cole C., Spiryagin V., Sun Y. Q., McSweeney T., *Design and Simulation of Heavy Haul Locomotives and Trains*, CRS Press, 2017.
- [14] Mancini, G., & Cera, A. (2008). *Design of railway bogies in compliance with new EN 13749 European standard*. In *Proceedings of WCRR (Vol. 2008)*.
- [15] EN, B. S. "13749: 2005." *Railway applications-Method of specifying structural requirements of bogie frame*, IS.
- [16] Komisji, D. (2011). 18/UE z dnia 1 marca 2011 r. zmieniająca załączniki II, V i VI do dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/57/WE w sprawie interoperacyjności systemu kolei we Wspólnocie. Dz. Urz. UE L57 z dnia, 2, 2011.
- [17] <https://www.railengineer.uk/2015/09/01/freight-train-of-the-future/> [Dostęp: 01.10.2018]