

## **Materials used in the structure of rail vehicle wheels**

### **Materiały stosowane w budowie kół pojazdów szynowych**

*The subject of this text is the description of structural materials used in the structure of railway vehicle wheels. The characteristic of this structural element as well as its functional and material requirements are presented. The description of commonly used carbon steels and alternative construction materials, such as cast steel, ADI cast iron or aluminum alloys, are presented in the further part, which are supposed to limit the wear of the wheel-rail friction pair and reduce the level of noise.*

*Przedmiotem niniejszego tekstu jest opis materiałów konstrukcyjnych stosowanych w budowie kół pojazdów szynowych. Przedstawiono charakterystykę tego elementu konstrukcyjnego, a także jego wymagania funkcjonalne oraz materiałowe. W dalszej części zaprezentowano opis powszechnie używanych stali węglowych oraz alternatywnych materiałów konstrukcyjnych, takich jak staliwo, żeliwa ADI czy stopy aluminium, które w założeniu miałyby ograniczać zużycie pary ciernej koło-szlina oraz zmniejszać poziom emitowanego hałasu.*

**Keywords:** wheels of rail vehicles, steel, cast steel, ADI cast iron, spoked wheels, aluminum alloys

**Słowa kluczowe:** koła pojazdów szynowych, stal, staliwo, żeliwo ADI, koła szprychowe, stopy aluminium

## **1 INTRODUCTION**

Spoked (shoulder) wheels were used in steam locomotives, in fact the first massively used rail vehicles. The structures of these wheels were characterized by large diameters, even up to 2300 mm, in order to obtain high vehicle speeds at a low rotational speed of the wheels (320 – 360 rpm), so as to avoid the need to use a gear. Making such large wheels in the form of a disc, i.e. in the present way, would involve not only a significant increase in their mass, but also a large consumption of material during production, which effectively reduces the economic profitability. Cast steel (cast) wheels with spokes allowed to find a compromise between the strength of the structure and the weight of the used wheels. This structure also allowed for the casting of counterweights, the task of which was to balance, among others, the bond masses.

Introduction of diesel and electric locomotives led to changes in the structure of the wheels. Driving the axles, not the individual wheels, and using the gears allowed to use the wheels with smaller diameter made of steel. For example, the nominal wheel diameter of the currently operated locomotives is 1150 mm (Siemens ES64U4), the electric multiple units – 870 mm (Stadler Flirt 3), and for the tram vehicles – 620

## **1 WPROWADZENIE**

W parowozach, czyli de facto pierwszych stosowanych masowo pojazdach szynowych, stosowano koła szprychowe (ramienne). Konstrukcje tych kół odznaczały się znacznymi średnicami, nawet do 2300 mm, w celu uzyskania wysokich prędkości pojazdu przy niewielkiej prędkości obrotowej kół (320 – 360 obr./min), tak aby uniknąć potrzeby stosowania przekładni. Wykonywanie tak dużych kół w postaci tarczy, czyli w sposób terazniejszy, wiązałoby się nie tylko ze znacznym zwiększeniem ich masy, ale także dużym zużyciem materiału podczas produkcji co skutecznie obniża opłacalność ekonomiczną. Koła staliwne (odlewane) posiadające szprychy umożliwiły znalezienie kompromisu między wytrzymałością konstrukcji, a masą stosowanych kół. Taka konstrukcja pozwalała również na odlewanie przeciwwag, których zadaniem było równoważenie m.in. mas wiązarów.

Pojawienie się lokomotyw spalinowych i elektrycznych doprowadziło do zmian w budowie kół. Napędzanie osi, a nie poszczególnych kół oraz stosowanie przekładni pozwoliło na użycie kół o mniejszej średnicy wytwarzanych ze stali. Przykładowo nominalna średnica kół obecnie eksploatowanych lokomotyw to 1150 mm (Siemens ES64U4), elektrycznych zespołów trakcyjnych – 870 mm (Stadler Flirt 3), natomiast po-

mm (Solaris S105p). In addition, increasing the pressures and traction forces made it necessary to use wheels with greater strength, which can be obtained by using steel wheels. For this reason, the currently used type of wheels of rail vehicles is solid steel wheels. As a result of efforts to improve the operation of regional vehicles, metro, high-speed or freight wagons, through among others reducing the unsprung mass and the noise level, it is proposed to replace the conventional carbon steel with alternative materials such as cast steel, ADI cast iron or aluminum alloys.

## 2 CHARACTERISTIC OF WHEELS OF RAIL VEHICLES

The main functions of a railway wheel are guiding the wheelsets and, consequently, the entire rail vehicle along the track, as well as the distribution of normal and traction forces [3]. In most cases, the wheels of rail vehicles are rigidly mounted on a common axle and they constitute a wheelset that forms an unsprung mass, and its specificity of movement consists in self-centering due to kinematic track guidance. In the case of tram vehicles with independently driven wheels, the function of kinematic control in the track is performed by electric motors, which rotating at different angular velocities, compensate for the difference in the paths traveled by the inner and outer wheels.

There are solid wheels, i.e. those that form one whole, and wheels with rim (duoblock) equipped with a replaceable rim shrink-fitted to the wheel centre. The advantages of solid wheels include the simpler structure and potentially greater reliability due to their monolithic structure. However, their disadvantage is the relatively shorter life of the entire wheel due to the limited amount of material intended for the loss caused by operational wear. The advantages of rim wheels are the long life of the wheel centre and the possibility of replacing the rim, but their main disadvantage is the possibility of rotating of the rim after heating due to the operation of the block brake. Wheels with rim must be gradually removed from the freight and passenger rolling stock due to the implementation of K-type composite brake blocks (in newly manufactured freight wagons), LL-type brake blocks (in already used freight wagons) and L-type brake blocks (for the brakes of bogies of passenger wagons). The heat emission as a result of the contact of such inserts with the wheel tread is so high that it could lead to the decomposition of the rimmed wheel.

Fig. 1 presents a typical solid wheel design. According to a common approach, such a wheel consists of a hub that responsible for shrink connection to the axle of the wheelset, a rim that makes contact with the rail and a disc that connects the two parts. The outer surface of the rim that contacts the rail is the running surface, but its the flange-shaped protruding part is the rim.

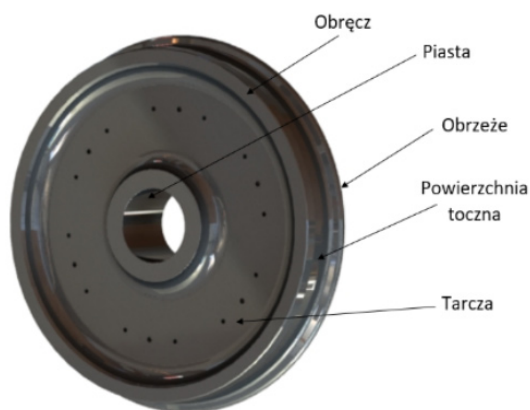
jazdów tramwajowych – 620 mm (Solaris S105p). Dodatkowo zwiększenie nacisków oraz sił trakcyjnych wymusiło konieczność stosowania kół o większej wytrzymałości, którą można uzyskać stosując stalowe koła. Z tego powodu, obecnie stosowanym rodzajem kół pojazdów szynowych są stalowe koła pełne. Wskutek dążeń do poprawy eksploatacji pojazdów regionalnych, metra, wysokich prędkości czy wagonów towarowych, poprzez m.in. redukcję masy nieusprężynowanej oraz poziomu emitowanego hałasu, proponuje się zastąpienie konwencjonalnej stali węglowej alternatywnymi materiałami, takimi jak staliwo, żeliwo ADI czy stopy aluminium.

## 2 CHARAKTERYSTYKA KÓŁ POJAZDÓW SZYNOWYCH

Naczelnymi funkcjami koła kolejowego są prowadzenie zestawów kołowych i w efekcie całego pojazdu szynowego po torze, a także dystrybucja sił normalnych i trakcyjnych [3]. W większości przypadków koła pojazdów szynowych są sztywno osadzone na wspólnej osi i razem stanowią zestaw kołowy, który tworzy masę nieusprężynowaną, a jego specyfika ruchu polega na samocentrowaniu wskutek kinematycznego prowadzenia po torze. W przypadku pojazdów tramwajowych z niezależnie napędzanymi kołami, funkcję kinematycznego sterowania w torze realizują silniki elektryczne, które obracając się z różnymi prędkościami kątowymi, kompensują różnicę w drogach przebytych przez koło wewnętrzne oraz zewnętrzne.

Wyróżnia się koła monoblokowe, czyli takie, które tworzą jedną całość, oraz koła obręczowane (duoblokowe), wyposażone w wymienną obręcz łączoną skurczowo z kołem bosym. Do zalet kół monoblokowych można zaliczyć prostszą budowę i potencjalnie większą niezawodność z powodu ich monolitycznej budowy. Ich wadą jest natomiast relatywnie krótsza żywotność całego koła ze względu na ograniczoną ilość materiału przeznaczonego na ubytek spowodowany zużyciem eksploatacyjnym. Zaletami kół obręczowanych są długa żywotność koła bosego oraz możliwość wymiany obręczy, natomiast ich naczelną wadą jest możliwość obracania się obręczy po rozgrzaniu wskutek działania hamulca klockowego. Koła obręczowane muszą być stopniowo wycofywane z taboru towarowego oraz osobowego ze względu na wdrażanie kompozytowych wstawek hamulcowych typu K (w nowo produkowanych wagonach towarowych), wstawek typu LL (w wagonach towarowych już używanych) oraz wstawek typu L (do hamulców wózków wagonów osobowych). Emisja ciepła wskutek kontaktu tego typu wstawek z powierzchnią toczną koła jest tak duża, że mogłaby doprowadzić do dekompozycji koła obręczowanego.

Na rys. 1 przedstawiono typową konstrukcję koła monoblokowego. Zgodnie z powszechnym podejściem, takie koło składa się z piasty odpowiadającej za połączenie skurczowe z osią zestawu kołowego, obręczy realizującej kontakt z szyną i tarczy, która łączy obie



Rys. 1 Koło kolejowe monoblokowe wraz z jego częściami [opracowanie własne]

Fig. 1 Solid railway wheel with its parts [own study]

Legenda/legend: obręcz - rim, piasta - hub, obrzeże - flange, powierzchnia toczna - wheel tread, tarcza - disc

The wheel tread is the most exposed to mechanical wear, which makes the wheel contact with the rail and it is on its surface the contact phenomena occur which affect the mutual wear of these elements. However, as a result of covering the curves that cause the contact of rim with the side of rail head, or the contact of rim tip with the groove of the groove-plate crossing in the case of tram vehicles, the rim is also subject to accelerated wear processes.

In order to reduce the weight and increase the strength and thermal properties, the wheel discs with various shapes are used, among others straight, conical, S-shaped, spoked and curved (Fig.2). The rimmed wheels are used in tram vehicles, in which a flexible vibration-damping insert is located between the wheel centre and the rim.

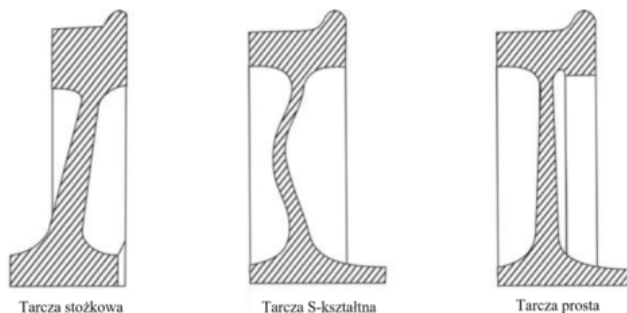
### 3 FUNCTIONAL REQUIREMENTS FOR RAILWAY WHEELS

To describe the working conditions of railway wheels it should be presented the following phenomena occurring at the contact of the wheel with the rail:

- Contact stresses with high values caused by the small contact area between wheel and rail which is approximately  $1 \text{ cm}^2$ . The stress distribution in this zone is simplified according to Hertz's theory. This implies the fact that the maximum stresses occur in the center of the contact area at a certain depth inside the material. In addition, the high contact stresses lead to surface crush and, as a result, the formation of compressive stresses from the running surface.
- Transfer of longitudinal (circumferential) traction and braking forces to the tractive elements of the vehicle - during acceleration or braking the wheel rim heats up and tensile and compressive stresses occur as a result which may cause cracks.

części. Zewnętrzna powierzchnia obręczy, która styka się z szyną to powierzchnia toczna, natomiast jej wystająca część w kształcie kołnierza to obrzeże.

Na zużycie mechaniczne najbardziej narażona jest powierzchnia toczna koła, która realizuje kontakt koła z szyną i to na jej powierzchni zachodzą zjawiska kontaktowe wpływające na wzajemne zużycie tych elementów. Jednakże wskutek pokonywania łuków, powodujących kontakt obrzeża z bokiem główki szyny, czy kontaktu wierzchołka obrzeża z rowkiem krzyżownicy płytkorowkowej w przypadku pojazdów tramwajowych, również obrzeże ulega procesom przyspieszonego zużycia.



Rys. 2 Przykładowe rodzaje tarczy kół [3]

Fig. 2 Examples of types of wheel discs [3]

Legenda/legend:

tarcza stożkowa - conical disc, tarcza s-kształtna - s-shaped disc, tarcza prosta - straight disc,

W celu redukcji masy oraz zwiększenia właściwości wytrzymałościowych i termicznych, stosuje się tarcze kół o różnych kształtach m.in. proste, stożkowe, S-kształtne, szprychowe oraz wykrzywione (rys. 2). W pojazdach tramwajowych wykorzystuje się koła obręczowane, w których pomiędzy kołem bosym a obręczą znajduje się elastyczna wkładka tłumiąca drgania.

### 3 WYMAGANIA FUNKCJONALNE STAWIANE WOBEC KÓŁ KOLEJOWYCH

Aby opisać warunki pracy kół kolejowych należy przedstawić poniższe zjawiska występujące na styku koła z szyną:

- Naprężenia kontaktowe o wysokich wartościach spowodowane małą powierzchnią styku koła z szyną, która w przybliżeniu wynosi ok.  $1 \text{ cm}^2$ . Rozkład naprężeń w tej strefie występuje, w uproszczeniu, według teorii Hertza. Implikuje to fakt, że maksymalne naprężenia występują w środku obszaru kontaktu na pewnej głębokości wewnątrz materiału. Dodatkowo wysokie naprężenia kontaktowe prowadzą do zgniotu powierzchniowego i w efekcie tworzenia się naprężeń ściskających od powierzchni tocznej.
- Przenoszenie wzdłużnych (obwodowych) sił trakcyjnych oraz hamujących na elementy pociągowe pojazdu – podczas przyspieszania lub hamowania, następuje nagrzewanie się obręczy koła i w efekcie powstawania naprężeń rozciąg-

- Abrasion and plastic deformation of the surface as a result the presence of abrasive particles e.g. wear products, pieces of crushed stone or sand between the wheel and the rail.
- The occurrence of transverse, longitudinal and drilling slidings between the wheel and the rail, leading to increases of local temperature, by which a martensitic structure is produced that initiates spalling, i.e. a loss of a small fragment of the wheel's running surface caused by the formation of a martensitic structure as a result of increase of local temperature. The martensitic structure, hard and brittle, is more prone to cracks and chipping, which is a clearly negative phenomenon [4]. Additionally, local temperature increases may occur during sudden braking. For this reason the thermal hardening can occur due to the earlier rapid cooling of the heated wheel running surfaces.

The wheel of a railway vehicle, because of its key tasks in guiding the vehicle along the track, is a structural element in which it is unacceptable that any critical damage occurs such as rim crack that could lead to derailment of the vehicle [3]. The key functional characteristics, that an engineering object such as a wheel of rail vehicle must have, include:

- Ability to transfer the high pressures resulting from a relatively small contact area between the wheel and the rail.
- High resistance to fatigue caused by rolling contact (RCF) which results from the cyclic rolling motion of the wheel along the rail and from the following phenomena occurring at the contact of the wheel with the rail:
  - longitudinal slidings resulting from acceleration and braking of the vehicle,
  - lateral slidings occurring during lateral movements of a wheelset due to self-centering,
  - drilling slidings occurring as a result of occurring the conical profile of the wheel acting around the normal axis in the contact area.
- Good machinability required during machining which is essential to obtain the correct rolling profile, both during production and re-profiling of the wheel.
- High abrasion resistance as well as ensuring the adequate cooperation with harder rails which are made of pearlitic steel.
- Thermal resistance due to local temperature increases in the area of the wheel contact with the rail, and also due to the interaction of the running surface or the wheel disc with friction linings and brake discs.
- Possibility of a shrink connection with a steel axle.

gających oraz ściskających, które mogą powodować pęknięcia.

- Ścieranie i odkształcanie plastyczne powierzchni wskutek obecności cząstek ściernych, np. produktów zużycia, kawałków tłucznia bądź piasku, między kołem a szyną.
- Występowanie między kołem a szyną poślizgów: poprzecznych, wzdłużnych oraz wiertnych, prowadzących do lokalnych wzrostów temperatury przez co wytwarza się struktura martenzytyczna inicjująca łuszczenie (ang. *spalling*), czyli ubytek niewielkiego fragmentu powierzchni tocznej koła spowodowany powstaniem struktury martenzytycznej w wyniku lokalnego wzrostu temperatury. Struktura martenzytyczna, twarda i krucha, jest bardziej podatna na pęknięcia i wykruszenia co jest zjawiskiem jednoznacznie negatywnym [4]. Dodatkowo lokalne wzrosty temperatury mogą powstawać podczas gwałtownego hamowania. Z tego powodu może wystąpić utwardzanie cieplne wskutek szybkiego chłodzenia wcześniej nagranych powierzchni tocznych kół.

Koło pojazdu szynowego, z powodu swoich kluczowych zadań w prowadzeniu pojazdu po torze, jest elementem konstrukcyjnym, w którym niedopuszczalne jest powstawanie krytycznych uszkodzeń, takich jak np. pęknięcie obręczy, które mogą prowadzić do wykołowania się pojazdu [3]. Do kluczowych cech funkcjonalnych, którymi musi cechować się obiekt inżynierski, jakim jest koło pojazdu szynowego, należy zaliczyć:

- Zdolność przenoszenia dużych nacisków, wynikających z relatywnie niewielkiej powierzchni styku między kołem a szyną.
- Wysoką odporność na zmęczenie spowodowane kontaktem tocznym (ang. *RCF – Rolling Contact Fatigue*), które wynika z cyklicznego ruchu tocznego koła po szynie oraz z następujących zjawisk występujących na styku koła z szyną:
  - poślizgów wzdłużnych pojawiających się podczas przyspieszania oraz hamowania pojazdu,
  - poślizgów poprzecznych występujących podczas przesunięć poprzecznych zestawu kołowego wskutek samocentrowania,
  - poślizgów wiertnych generowanych wskutek występowania stożkowatego zarysu profilu koła, działających wokół osi normalnej w obszarze styku.
- Dobrą skrawalność wymaganą podczas obróbki skrawaniem, która jest niezbędna do uzyskania odpowiedniego profilu tocznego, zarówno podczas produkcji jak i reprofilacji koła.
- Wysoką odporność na ścieranie, a także zapewnieniem odpowiedniej współpracy z



## 4 MATERIALS USED FOR WHEELS OF RAIL VEHICLES

### 4.1 Carbon steel

EN 13262 standard and UIC 510-2 leaflet recommend to use 3 types of hypoeutectoid steels with a ferritic-pearlitic structure for the structural material of a solid railway wheel. The types of steel are divided into grades and differ in mechanical properties and chemical composition. The chemical compositions of the used steels are presented in Table 1, but the list of steel grades with their mechanical properties is presented in Table 2 [7]. Currently, ER7 structural carbon steel is the most commonly used for the construction of solid wheels in Poland.

Standards [20] and [21] regulate the use of steel as a structural material for the wheel centre and the rim respectively. P23 steel is most often used to build the wheel centre, whose the chemical composition and mechanical properties are presented in Tables 3 and 4.

Table 5 presents the list of the steels used for railway wheel rims, but Table 6 presents the chemical compositions of typical steels used in the structure of these components.

twarszymi szynami, które wykonane są ze stali perlitycznej.

- Odpornością termiczną wskutek lokalnych wzrostów temperatury w obszarze styku koła z szyną, a także z powodu współpracy powierzchni tocznej lub tarczy koła z okładzinami ciemnymi i tarczami hamulcowymi.
- Możliwością połączenia skurczowego ze stalową osią.

## 4 MATERIAŁY STOSOWANE NA KOŁA POJAZDÓW SZYNOWYCH

### 4.1 Stal węglowa

Norma EN 13262 oraz karta UIC 510-2 zalecają użycie na materiał konstrukcyjny monoblokowego koła kolejowego 3 rodzajów stali podutektoidalnych, o strukturze ferrytyczno – perlitycznej. Rodzaje stali są podzielone na klasy i różnią się właściwościami mechanicznymi oraz składem chemicznym. Składy chemiczne stali stosowanych przedstawiono w tabeli nr 1, natomiast zestawienie klas stali wraz z ich właściwościami mechanicznymi zaprezentowano w tabeli nr 2 [7]. Obecnie w Polsce do budowy kół monoblokowych najpowszechniej stosuje się stal węglową konstrukcyjną ER7.

Tabela 1 Stale stosowane na koła kolejowe wraz ze składem chemicznym [19]  
Table 1 Steels used for railway wheels with their chemical composition [19]

Gatunek stali /Steel grade	Maksymalny udział procentowy pierwiastków [%]/Maximum percentage of elements [%]										
	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Cu [%]	Mo [%]	Ni [%]	V [%]	Cr Mo Ni [%]
ER6	0.48	0.40	0.75	0.20	0.015	0.30	0.30	0.08	0.30	0.06	0.50
ER7	0.52	0.40	0.80	0.20	0.015	0.30	0.30	0.08	0.30	0.06	0.50
ER8	0.56	0.40	0.80	0.20	0.015	0.30	0.30	0.08	0.30	0.06	0.50
ER9	0.6	0.40	0.80	0.20	0.015	0.30	0.30	0.08	0.30	0.06	0.50

Tabela 2 Zestawienie stali stosowanych do budowy kół kolejowych [19]  
Table 2 List of steels used in the construction of railway wheels [19]

stali wg normy EN 13262/ Steel type acc. to EN 13262 standard	Rodzaj stali wg normy EN 13262/ Steel type acc. to EN 13262 standard	Rodzaj stali wg karty UIC 510-2/ Steel type acc. to UIC 510-2 standard	Granica plastyczności [MPa]/ Yield point [MPa]	Wytrzymałość rozciąganie [MPa]/ Tension strength [MPa]	Zastosowanie/ Application
ER6	R6 T	ER 6	>500	780 – 900	wagony hamowane klockami/ wagons braked with blocks
ER7	R7 T	ER 7	> 520	820 – 940	wagony towarowe, wagony osobowe, pojazdy trakcyjne/ freight wagons, passenger wagons, traction vehicles
ER8	R8 T	ER 8	> 540	860 – 980	Lokomotywy/ locomotives
ER9	R9 T	ER 9	> 580	900 –1050	lokomotywy, pojazdy kombinowanych środków transportu/ locomotives, vehicles of combined means of transport

**Tabela 3 Skład chemiczny stali P23 [20]**  
**Table 3 Chemical composition of P23 steel [20]**

Oznaczenie gatunku stali/ Designation of the steel grade	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	Mo [%]	V [%]
P23	0.28	0.90	0.15 – 0.40	0.05	0.050	0.30	0.30	0.30	0.05	0.05

**Tabela 4 Właściwości mechaniczne stali P23 [20]**  
**Table 1 Mechanical properties of P23 steel [20]**

Oznaczenie gatunku stali/ Steel grade designation	Granica plastyczności [MPa]/ Yield point [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]/ Tension strength [MPa]
P23	240	420 - 500

**Tabela 2 Składy chemiczne stali stosowanych na obręcze kół kolejowych [21]**  
**Table 5 Chemical compositions of steel used for railway wheel rims [21]**

Oznaczenie gatunku stali/ Steel grade designation	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Cu [%]	Mo [%]	Ni [%]	Mo [%]	V [%]
P54	0.50 – 0.58	0.15 – 0.40	0.60 – 0.90	0.04	0.04	0.30	0.30	0.05	0.30	0.05	0.05
P55A	0.52 – 0.60	0.15 – 0.40	0.60 – 0.90	0.04	0.04	0.30	0.30	0.05	0.30	0.05	0.05
P60	0.57 – 0.65	0.15 – 0.40	0.60 – 0.90	0.04	0.04	0.30	0.30	0.05	0.30	0.05	0.05
P70	0.65 – 0.70	0.15 – 0.40	0.65 – 0.95	0.04	0.04	0.30	0.30	0.05	0.30	0.05	0.05

**Tabela 6 Właściwości mechaniczne stali stosowanych na obręcze kół pojazdów szynowych [21]**  
**Table 6 Mechanical properties of steels used for rims of rail vehicle wheels [21]**

Rodzaj stali wg normy EN 13262/ Steel type acc. to EN 13262 standard	Granica plastyczności [MPa]/ Yield point [MPa]	Wytrzymałość na zerwanie [MPa]/ Breaking strength [MPa]	Zastosowanie/ Application
P54	370 – 400	700 – 880	Obręcze tramwajowe, obręcze wagonów towarowych oraz pasażerskich/ Tram rims, rims of freight and passenger wagons
P55A	430	800 – 920	Obręcze wagonów osobowych, piętrowych, lokomotyw/ Rims of passenger and double-decker wagons and locomotives
P60	500	920 – 1050	Obręcze lokomotyw, obręcze tramwajowe/ Locomotive rims, tram rims
P70	nie określa się/ not specified	1000 – 1200	Obręcze tramwajowe/ Tram rims

What is worth emphasizing, in the case of rimmed wheels, the rims of the wheelsets should be made of steel with appropriate ductility and high tension strength. The steel with lower ductility than steel used for rims is used for wheel centres [14].

Considering the reasons for which unalloyed steels with a maximum carbon content of 0.50 – 0.65% are the material indicated for the production of railway wheels, it should be mentioned the following:

- high fatigue strength and abrasion resistance provided by the ferritic-pearlitic structure,
- good machinability,
- low elasticity,
- high thermal resistance,

Normy [20] i [21] regulują odpowiednio użycie stali jako materiału konstrukcyjnego koła bosego oraz obręczy. Do budowy koła bosego stosuje się najczęściej stal P23 której skład chemiczny oraz właściwości mechaniczne zaprezentowane są w tabelach 3 i 4.

W tabeli nr 5 przedstawiono zestawienie stali stosowanych na obręcze kół kolejowych, natomiast w tabeli nr 6 składy chemicznych typowych stali używanych do budowy tych komponentów.

Co warto podkreślić, w przypadku kół obręczowanych, obręcze zestawów kołowych powinny być wykonane z stali charakteryzującej się odpowiednią ciągliwością oraz dużą wytrzymałością na rozciąganie. Na koła bose wykorzystuje się stal o mniejszej ciągliwości od stali wykorzystywanej na obręcze [14].

- wide availability of steel, as well as a relatively low degree of complexity of its processing, which clearly reduces the costs of vehicle operation.

#### 4.2 Cast steel

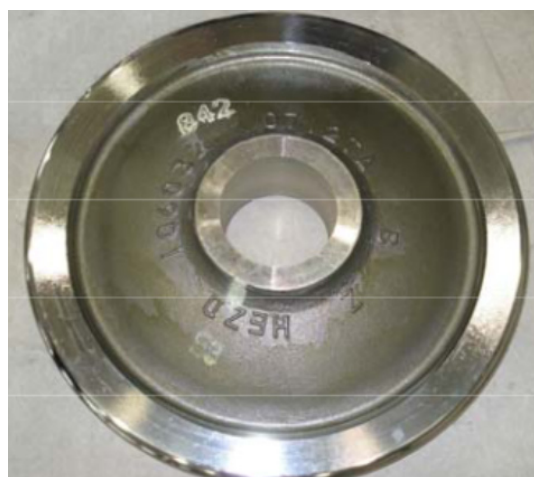
Cast steel, that is not processed plastically iron-carbon alloy, is also used in the construction of rail vehicle wheels. Cast steel wheels are the most widely used in the freight wagons, mainly due to lower requirements concerning the ride comfort. As reported in [5], 75% of the wheels of rail cargo vehicles in the USA are the cast steel wheels. This type of wheels has also been used in other countries, such as Poland and Sweden. A cast steel railway wheel is presented in Fig 3.

Rozpatrując powody, dla których stale niestopowe o maksymalnej zawartości węgla wynoszącej 0,50 – 0,65% o są materiałem wskazanym na produkcję kół kolejowych należy wymienić:

- wysoką wytrzymałość zmęczeniową oraz odporność na ścieranie, którą zapewnia struktura ferrytyczno – perlityczna,
- dobrą skrawalność,
- małą sprężystość,
- wysoką wytrzymałość termiczną,
- szeroką dostępność stali, a także relatywnie niski stopień skomplikowania jej obróbki, co jednoznacznie obniża koszt eksploatacji pojazdu.

**Tabela 7 Właściwości stopów stosowanych do produkcji kół stalowych [5]**  
**Table 7 Properties of alloys used in the production of cast steel wheels [5]**

	Klasa B wg AAR/Class B acc. to AAR	Klasa C wg AAR/ Class C acc. to AAR
Zawartość węgla [%]/Carbon content [%]	0.57 – 0.67	0.67 – 0.77
Twardość HB/ HB Hardness	334	352



Rys. 3 Staliwne koło kolejowe [10]  
 Fig. 3 Cast steel railway wheel [10]

The commonly used cast steel wheels are made of iron-carbon alloys, which are also used in the production of steel wheels – class B and C, as well as ER7. The properties of the alloys of B and C class according to AAR (The Association of American Railroads) are presented in Table 7. Due to the higher carbon content in these alloys, their plasticity and ductility decrease. Despite the difference in these properties as compared to the conventional steel wheels, no damage was observed in the operational aspects of this type of wheels [10]. The motivations in favor of introducing cast steel as a construction material for the wheel are primarily the simpler production technology (the wheel is not plastically processed) and the associated reduction of production time and cost reduction.

#### 4.3 ADI Cast Iron

ADI cast iron (*Austempered Ductile Iron*) is obtained by austenitization and hardening. It is characterized by high tension strength and abrasion resistance, at the

#### 4.2 Staliwo

Staliwo, czyli nieobrobiony plastycznie stop żelaza z węglem, również znajduje zastosowanie w budowie kół pojazdów szynowych. Staliwne koła są najszerzej eksploatowane w wagonach towarowych, głównie z powodu mniejszych wymagań dotyczących komfortu jazdy. Jak podano w pracy [5], 75% kół szynowych pojazdów towarowych w USA to koła stalowe. Ten rodzaj kół był lub jest eksploatowany również w innych krajach, takich jak Polska czy Szwecja. Staliwne koło kolejowe przedstawione jest na rys. 3.

Powszechnie używane stalowe koła są wykonywane ze stopów żelaza z węglem, które są również używane do produkcji kół stalowych – klasy B oraz C, a także ER7. Właściwości stopów klasy B i C wg AAR (The Association of American Railroads) przedstawiono w tabeli nr 7. Wskutek wyższej zawartości węgla w tych stopach, maleje ich plastyczność oraz ciągliwość. Pomimo różnicy w tych właściwościach w stosunku do konwencjonalnych kół stalowych, nie obserwuje się uszczerbku w aspektach eksploatacyjnych tego rodzaju kół [10]. Motywacje przemawiające za wprowadzeniem staliwa jako materiału konstrukcyjnego koła to przede wszystkim prostsza technologia wytwarzania (koło nie jest obrabiane plastycznie) i związane z nią skrócenie czasu produkcji oraz redukcja kosztów.

#### 4.3 Żeliwo ADI

Żeliwo ADI (ang. *Austempered Ductile Iron*) otrzymuje się w wyniku austenitizacji i hartowania. Odznacza się wysoką wytrzymałością na rozciąganie oraz odpornością na ścieranie, jednocześnie posiadając wysoką plastyczność, co czyni z tego materiału atrakcyjną alternatywę do stali oraz staliwa, a także żeliwa sferoidalnego [8] [13].

Interesujące próby wprowadzenia żeliwa ADI jako

same time having high plasticity, which makes this material an attractive alternative to steel and cast steel, as well as spheroidal cast iron [8] [13].

Interesting attempts to introduce ADI cast iron as an alternative material for the construction of railway wheels are carried out in Germany, China and Italy [1][6][18]. Two concepts of spoked wheels are being developed - the solid wheel („ADI Spoked Wheel” design) and the rim wheel - the „Liberty Wheel” design in the two main ideological fronts. The main motivation of the ADI project, which is being developed in Germany with the participation of Siemens Mobility and the scientific community, is the construction of a spoked wheel intended for metro wagons, in which the reduction of unsprung mass would bring benefits in the form of reducing wheel polygonization, as well as limiting the emission of vibroacoustic phenomena (Fig 4) [17]. The Liberty Wheel project, developed in Italy, is aimed at redefining the rim wheel by making the wheel centre in the form of the spoked wheel and, thanks to the obtained reduction of mass, minimizing the forces at the contact of the wheel centre and the rim [2]. Both concepts have a divided wheel disc with two rows of spokes.

The most important features influencing ADI's competitiveness in relation to steel as a conventional material used in the structure of railway wheels are:

- the ability to self-lubricate resulting from the presence of graphite, which will significantly limit the wear processes,
- about 3 times greater ability to dampen vibrations than steel, which will limit the emission of vibroacoustic phenomena and improve the cooperation of the wheel with the rail,
- wide possibilities of assigning the complex geometries of the wheel disc, which are necessary to obtain the appropriate distribution of stresses,
- lower density than conventionally used steels resulting in a reduced weight of the wheel and consequently the reduced unsprung mass created by the wheelset (a weight reduction of approx. 10% is expected).



Rys. 4 Projekt kół szprychowych „ADI Spoke Wheel” [9]  
Fig. 4 Design of spoked wheels „ADI Spoke Wheel” [9]

alternatywnego materiału na konstrukcję kół kolejowych prowadzone są w Niemczech, Chinach oraz we Włoszech [1][6][18]. W dwóch głównych frontach ideowych rozwijane są dwie koncepcje kół szprychowych – koło monoblokowe (projekt „ADI Spoke Wheel”) oraz koło obręczowane – projekt „Liberty Wheel”. Główną motywacją projektu „ADI Spoke Wheel”, który prowadzony jest w Niemczech przy współudziale firmy Siemens Mobility oraz środowiska naukowego jest skonstruowanie koła szprychowego przeznaczonego dla wagonów metra, w którym redukcja masy nieusprężynowanej miałaby nieść za sobą korzyści w postaci zmniejszenia poligonizacji kół, a także ograniczenia emitowania zjawisk wibroakustycznych (rys. 4) [17]. Projekt Liberty Wheel rozwijany we Włoszech, ukierunkowany jest na redefinicji koła obręczowanego, poprzez wykonanie koła bosego w postaci koła szprychowego i dzięki uzyskanej redukcji masy, zminimalizowanie sił panujących na styku koła bose – obręcz [2]. Obydwie koncepcje posiadają dzieloną tarczę koła z dwoma rzędami szprych.

Do najważniejszych cech, wpływających na konkurencyjność ADI w stosunku do stali jako konwencjonalnego materiału stosowanego do budowy kół kolejowych można zaliczyć:

- zdolność do samosmarowania, wynikająca z obecności grafitu, co znacznie ograniczy procesy zużywania,
- około 3-krotnie większą zdolnością tłumienia drgań aniżeli stal, co ograniczy emitowanie zjawisk wibroakustycznych oraz poprawi współpracę koła z szyną,
- szerokie możliwości nadawania skomplikowanych geometrii tarczy koła, które są niezbędne w celu uzyskanie odpowiedniej dystrybucji naprężeń,
- mniejszą gęstość aniżeli konwencjonalnie stosowanych stali, co przekłada się na redukcję masy koła i w efekcie zmniejszenie masy nieusprężynowanej, którą tworzy zestaw kołowy (przewiduje się redukcję masy o ok. 10%).

W tabeli nr 8 zaprezentowano właściwości typowych żeliw ADI przeznaczonego na koła pojazdów szynowych [1].

Warto zaznaczyć, że oprócz zalet związanych stricte z aspektami materiałoznawczymi, koło szprychowe niesie ze sobą jeszcze dwie inne zalety wynikające z geometrii tarczy - nie tworzy membrany wibroakustycznej co skutecznie ogranicza generowanie drgań i hałasu oraz zapewnia lepszy dostęp w celach oceny stanu technicznego elementów układu hamulcowego pojazdu [12].

#### 4.4 Stopy aluminium

Stopy aluminium są coraz powszechniej stosowane w budowie pojazdów szynowych, głównie z powodu dążeń do redukcji masy. Wykonuje się z nich elementy



**Tabela 8 Właściwości żeliw ADI [9]**  
**Table 8 Properties of ADI cast irons [9]**

	ADI 800	ADI 1200	ADI 1400
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]/ Density [g/cm <sup>3</sup> ]	7.1	7.1	7.1
Granica plastyczności [MPa]/ Yield point [MPa]	500	850	1100
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]/ Tension strength [MPa]	800	1200	1400
Twardość [HB]/ Hardness [HB]	250 – 310	340 – 420	400

Table 8 presents the properties of typical ADI cast irons intended for wheels of rail vehicles [1].

It is worth to emphasize that apart the advantages related strictly to the material science aspects, the spoked wheel has two other advantages due to the geometry of the disc - it does not create a vibroacoustic membrane, which effectively limits the generation of vibrations and noise and provides better access for assessing the technical condition of the vehicle's braking system components [12].

#### 4.4 Aluminium alloys

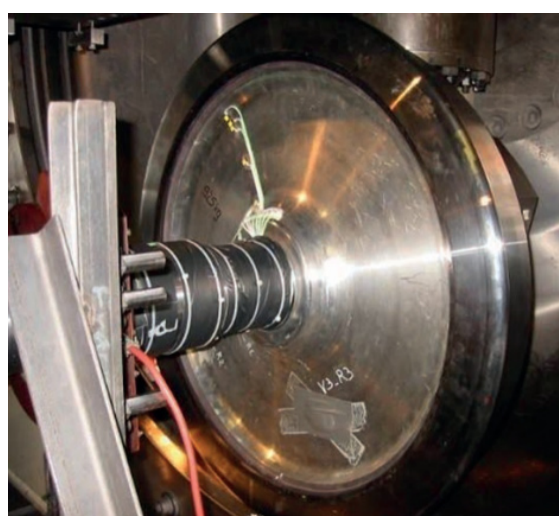
Aluminum alloys are increasingly used in the structure of rail vehicles, mainly due to efforts to reduce the weight. The parts of body and gear housing are made of them. However, in the past, the attempts were made to construct the aluminum wheel centres, leaving the classic steel rim to ensure the proper wheel-rail contact properties. An example of such a wheel produced by Otto Fuchs KG is shown in Fig.5.

The positive aspects of using the aluminum alloys for the production of wheel centre are [11]:

- reduction of the mass of the whole wheel, which translates into the limit of the unsprung mass of the wheelset, resulting in the reduction of the intensity of impact loads at the contact of the wheel with the rail,
- reduction of stresses occurring in the rim, as well as the greater resistance of the wheel to corrosion and polygonization due to about 3 times lower value of the modulus of elasticity of aluminum than steel.

Typical aluminum alloys used in the production of wheel centres of rail vehicles are presented in Table 9. They are EN AW 6082 T6 and EN AW 6110 A alloys, which are aluminum alloys with magnet, manganese and silicon.

nadwozia oraz obudowy przekładni. Jednakże w przeszłości stawiane są próby skonstruowania aluminiowych kół bosych, pozostawiając klasyczną obręcz wykonaną ze stali w celu zapewnienia odpowiednich właściwości kontaktowych koła z szyną. Przykład takiego koła produkcji Otto Fuchs KG prezentuje rys 5.



Rys. 5 Koło aluminiowo – stalowe [11]  
 Fig. 5 Aluminum – steel wheel [11]

Pozytywne aspekty użycia stopów aluminium do produkcji kół bosych to [11]:

- redukcja masy całego koła, przekładająca się na ograniczenie masy nieusprężynowanej zestawu kołowego, skutkująca zmniejszeniem intensywności obciążeń uderzeniowych na styku koła z szyną,
- zmniejszenie naprężeń występujących w obręczy, a także większa odporność koła na korozję oraz poligonizację z powodu około 3-krotnie mniejszej wartości modułu sprężystości aluminium aniżeli stali.

**Tabela 9 Właściwości stopów aluminium stosowanych do budowy kół bosych [11]**  
**Table 9 Properties of aluminum alloys used in the construction of wheel centres [11]**

	EN AW 6082 T6	EN AW 6110 A
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]/ Density [g/cm <sup>3</sup> ]	2.70	2.71
Granica plastyczności [MPa]/ Yield point [MPa]	250-260	330-380
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]/ Tension strength [MPa]	290-310	360-410
Hardness [HB]	90	110

Another attempt to implement the aluminum for the structure of rail vehicle wheels is the RONA project, which was carried out in the years 1994-1996 by the French carrier SNCF. The aim of this initiative was to design wheels for TGV vehicles with the lower noise level [15][16]. The Alu4 concept was selected through the experimental and simulation studies. It was assumed that a wheel structure contained an aluminum wheel centre and a rim made of conventional steel. Its weight was similar to the weight of a wheel made of steel, while thanks to the use of aluminum, which has approx. 3 times lower density than steel, it was possible to use a thicker disc without the loss of a significant increase in the weight of the wheel. As a result of changes in the geometry of the wheel disc, an increase in the natural frequency of the one-nodal-circle axial mode was obtained, which translated into a reduction of the noise emission level at the level of 4.5 dB.

## 5 SUMMARY

The wheels of rail vehicles, due to their main functions, that is guiding the vehicle on the track and force distribution, are exposed to many unfavorable phenomena, such as high contact stresses, relative slippages between the wheel and rail or shock loads. Since the change in wheel structure from spoked to solid, the carbon steel has been the main material from which the wheels are made. This state of affairs is due to the numerous advantages of steel, such as a good ratio of mechanical strength to plasticity, high machinability as well as wide availability and suitable cooperation with the rails made of pearlitic steel. Along with the tendency to limit the weight of the wheelset, its wear and the level of emitted noise, it is proposed to use alternative construction materials for the structure of rail vehicle wheels as an alternative to conventionally used carbon steels. The wheels made of cast steel have a simpler and cheaper production technology. The spoked wheels made of ADI cast iron, which thanks to their features, such as the ability to self-lubricate, damping vibrations, as well as the possibilities of weight reduction, limit the wear and vibration emitting. Manufacturing the wheel centre from the aluminum alloys, besides reduction of weight or limiting the wear, also contributes to reduction of the level of emitted noise. An important aspect is the influence of the construction material of the wheel on the possibility of shaping its geometry, which also affects the properties of the dynamic structure of the wheel. The use of ADI cast iron makes it possible to obtain the spoke disc with a lower mass and a more favorable distribution of stresses than a solid disc, and the use of aluminum alloys - a disc with greater thickness,

Typowe stopy aluminium stosowane do produkcji kół bosych pojazdów szynowych przedstawiono w tabeli nr 9. Są nimi stopy EN AW 6082 T6 oraz EN AW 6110 A, będące stopami aluminium z magnezem, manganem oraz krzemem.

Inną próbą implementacji aluminium do budowy kół pojazdów szynowych jest projekt RONA, który był prowadzony w latach 1994-1996 przez francuskiego przewoźnika SNCF. Celem tej inicjatywy było zaprojektowanie kół do pojazdów TGV, cechujących się niższym poziomem emitowania hałasu [15][16]. Na drodze badań eksperymentalnych oraz symulacyjnych, wybrano koncepcję Alu4. Zakładała ona konstrukcję koła zawierającego aluminiowe koło bosc i obręcz wykonaną z konwencjonalnej stali. Jego masa była podobna do masy koła wykonanego ze stali, natomiast dzięki użyciu aluminium, które ma ok. 3-krotnie mniejszą gęstość niż stal, możliwe było zastosowanie grubszej tarczy bez uszczerbku polegającego na znacznym zwiększeniu masy koła. Wskutek zmian w geometrii tarczy koła, uzyskano zwiększenie częstotliwości drgań własnych osiowej postaci o jednym okręgu węzłowym (ang. *one-nodal-circle axial mode*), co przełożyło się na redukcję poziomu emitowania hałasu na poziomie 4,5 dB.

## 1 PODSUMOWANIE

Koła pojazdów szynowych ze względu na swoje naczelną funkcję, czyli prowadzenie pojazdu po torze oraz dystrybucję sił, narażone są na wiele niekorzystnych zjawisk, takich jak wysokie naprężenia kontaktowe, poślizgi względne między kołem i szyną czy obciążenia uderzeniowe. Od czasu zmiany konstrukcji kół z ramiennej na pełną, stal węglowa jest naczelnym materiałem, z którego wykonuje się koła pojazdów szynowych. Taki stan rzeczy jest spowodowany licznymi zaletami stali, takimi jak dobra relacja wytrzymałości mechanicznej do plastyczności, wysoka obrabialność, a także szeroka dostępność i odpowiednia współpraca z szynami wykonanymi ze stali perlitycznej. Wraz z tendencjami zmierzającymi do ograniczenia masy zestawu kołowego, jego zużycia czy poziomu emitowanego hałasu jako alternatywę do konwencjonalnie stosowanych stali węglowych, proponuje się użycie alternatywnych materiałów konstrukcyjnych do budowy kół pojazdów szynowych. Koła wykonane ze staliwa posiadają prostszą oraz tańszą technologię produkcji. Koła szprychowe wykonane z żeliwa ADI, które dzięki swoim cechom, takim jak zdolność do samosmarowania, tłumienia drgań, a także możliwości redukcji masy, ograniczają zużycie i emitowanie drgań. Wyprodukowanie koła bosciego ze stopów aluminium, oprócz zmniejszenia masy czy ograniczenia zużywa-

contributing to the reduction of emitted noise, with simultaneous maintaining the basic mass of the wheel.

nia, również przyczynia się do redukcji poziomu emitowanego hałasu. Istotnym aspektem jest wpływ materiału konstrukcyjnego koła na możliwość kształtowania jego geometrii, która także wpływa na właściwości struktury dynamicznej koła. Użycie żeliwa ADI umożliwia uzyskanie tarczy szprychowej o mniejszej masie i korzystniejszym rozkładzie naprężeń aniżeli tarcza pełna, a stopów aluminium – tarczy o większej grubości, przyczyniającą się do redukcji emitowanego hałasu, przy jednoczesnym zachowaniu bazowej masy koła.

## BIBLIOGRAPHY/BIBLIOGRAFIA

- [1] Bracciali A., Masaggia S., Megna G., Veneri E.: *Quiet and light spoked wheel centres made of Austempered Ductile Iron*. 2019.
- [2] Bracciali A., Megna G.: *The liberty wheel*. 2019.
- [3] Iwnicki S.: *Handbook of railway vehicle dynamics*, CRC Press, 2006. <https://doi.org/10.1201/9780429469398>
- [4] Kwaśnikowski J., Małdziński L., Borowski J., Firlik B., et al.: *Analiza przyczyn przyspieszonego zużycia powierzchni tocznych kół autobusu szynowego SA 108 (215M)*. *Pojazdy Szynowe*. 2007, no 2, 2007, s. 1–13.
- [5] Lonsdale C., Bogacz R., Norton M., *Application of Pressure Poured Cast Wheel Technology for European Freight Service*. *9th World Conference on Railway Research*. 2011.
- [6] Mädler K.: *On the Suitability of ADI as an Alternative Material for (Railcar) Wheels*. *GIFA*. 1999, no 2, s. 267–272.
- [7] Mädler K., Bannasch M.: *Materials used for Wheels on Rolling Stock*. *7th World Congress on Railway Research*. 2006.
- [8] Małecka J., Żak K.: *Żeliwo ADI jako nowoczesny materiał konstrukcyjny - własności i zastosowanie*. *Międzynarodowe Sympozjum Metody Oceny Struktury oraz Własności Materiałów i Wyrobów*. 2010.
- [9] Megna G.: *Application of Austempered Ductile Irons to structural components of railway vehicles*. *Universita Degli Studi Firenze*. 2019.
- [10] Mi G., Li C., Liu Y., Zhang B., et al.: *Numerical simulation and optimization of the casting process of a casting-steel wheel*. *Engineering Review*. 2013, no 33(2), s. 93–99.
- [11] Otto Fuchs KG: *Aluminium wheel discs for rail traffic*.
- [12] Słowiński M.: *Czy koła szprychowe mają przyszłość w kolejnictwie?*. *Raport Kolejowy*, no 1, 2021.
- [13] Sokolnicki M.: *Żeliwo ausferytyczne o zwiększonych właściwościach wytrzymałościowych i plastycznych, przeznaczone na odlewy w pracy w warunkach dynamicznych obciążeń*. *Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie*. 2019.
- [14] Szudyga M.: *Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych stali stosowanej do kół i obręczy kolejowych zestawów kołowych*. *Politechnika Śląska*. 2011.
- [15] Thompson D., *Railway noise and vibration-mechanisms*. Elsevier. 2009.
- [16] Thompson D., Gautier P.E.: *Review of research into wheel/rail rolling noise reduction*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2006, no 220(4), s. 385–408. <https://doi.org/10.1243/0954409JRRT79>
- [17] Weber F.-J.: *Back to the future for spoked wheels*, [https://www.railjournal.com/in\\_depth/back-to-the-future-for-spoked-wheels](https://www.railjournal.com/in_depth/back-to-the-future-for-spoked-wheels) [dostęp: 10/17/2020].
- [18] Zhang H., Wu Y., Li Q., Hong X.: *Mechanical properties and rolling-sliding wear performance of dual phase austempered ductile iron as potential metro wheel material*. *Wear*. 2018, no 406–407, s. 156–165, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.04.005>
- [19] Norma PN-EN 13262+A1:2009: *Kolejnictwo - Zestawy kołowe i wózki - Koła - Wymagania dotyczące wyrobu*.
- [20] Norma PN-H-84027-1. *Stal dla kolejnictwa. Koła bose. Gatunki*.
- [21] Norma PN-84/PN-84027/06 *Stal dla kolejnictwa. Obręcze do kół pojazdów szynowych. Gatunki*.