

Issues of cooperation of wheel and rail in modern railways Zagadnienia współpracy koła i szyny we współczesnym kolejnictwie

The article presents the issues related to the interaction of the wheel and rail in modern rail vehicles. This interdisciplinary issue is becoming more and more important due to the progression of loads resulting from the constantly increasing pressure of the wheelset on the track and the speed of the running vehicles. Besides the tendency to increase the capacity of the railway lines is also increasing, which is related to the optimization of the transport potential, and thus leads to more and more frequent loads, which causes a greater wear of the cooperating friction work in a further consequence.

W artykule przedstawiono problematykę związaną z oddziaływaniem koła i szyny we współczesnych pojazdach szynowych. Zagadnienie to, o charakterze interdyscyplinarnym, nabiera coraz większego znaczenia ze względu na progresję obciążeń, wynikających ze stale powiększającego się nacisku zestawu kołowego na tor oraz prędkości kursujących pojazdów. Poza tym zwiększa się również tendencja do zwiększania przepustowości linii kolejowych, co jest związane z optymalizacją potencjału przewozowego, a tym samym prowadzi do coraz większych częstotliwości obciążeń, co powoduje w dalszej konsekwencji większe zużycie współpracującej pracy ciernej.

1. INTRODUCTION

The wheel-rail system forms the strength system, which is one of the most loaded in railways. The load or the system of loads (forces) which is further progression as a result of the increasing pressure of the wheelset on the track (especially rail transport of loads, where the static vertical wheel pressure has already increased to 250 kN) and speed (passenger rail transport, long-distance passenger transport with high speeds). Here it may be important the indicator related to the kilometer mileage of high-speed multiple units of 500 000 km per year. This means that the loads and forces of a variable nature appear with an average frequency in the giga-cycle range ($N=2 \cdot 10^9$ cycles). Another factor influencing the wheel-rail system is the requirement of availability, reliability and durability of the railway infrastructure and the vehicle, which is the result of more and more advanced competition between different kinds of transport. The wheel-rail system is the result of the cooperation or interaction between the infrastructure and the vehicle.

Two important factors affect the wheel-rail system:

- trajectory, track geometry and rail profile
- outer outline of the wheel rim and the width of the wheelset "guide".

The wheel-rail system is related to many regulations contained in ORE/ERRI reports, UIC leaflets, European standards, TSI regulations developed by the European Committee for Standardization (CEN).

The wheel-rail system influences the following factors related to railway traffic:

1. WSTĘP

Układ koło-szyna tworzy węzeł wytrzymałościowy, który należy do najbardziej obciążonych w kolejnictwie. Obciążenie, albo układ obciążeń (sił) ulega dalszej progresji, wskutek powiększającego się nacisku zestawu kołowego na tor (zwłaszcza transport kolejowy ładunków, gdzie statyczny nacisk pionowy koła wzrósł już do 250 kN) oraz prędkości (transport kolejowy osobowy, transport osobowy dalekobieżny z wysokimi prędkościami). Istotnym może tutaj być wskaźnik związany z przebiegiem kilometrowym zespołów trakcyjnych wysokich prędkości, wynoszący 500 000 km w skali rocznej. Oznacza to, że obciążenia, siły mające charakter zmienny pojawiają się ze średnią częstotliwością w zakresie giga-cyklowym ($N=2 \cdot 10^9$ cykli). Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na układ koło-szyna jest wymaganie dyspozycyjności, niezawodności oraz trwałości infrastruktury kolejowej i pojazdu, co jest wynikiem coraz bardziej zaawansowanej rywalizacji między różnymi rodzajami transportu. Układ koło-szyna jest wynikiem współpracy lub oddziaływania pomiędzy infrastrukturą i pojazdem.

Na układ koło-szyna mają wpływ dwa istotne czynniki:

- trajektoria, geometria toru i profil szyny
- zarys zewnętrzny wieńca koła i szerokość „prowadna” zestawu kołowego.

Układ koło-szyna jest powiązany z wieloma przepisami zawartymi w raportach ORE/ERRI, kartach UIC, normach europejskich, przepisach TSI, opracowanych przez Europejski Komitet Normalizacyjny-

- running safety of rail vehicle in quasi-static conditions
- running safety of rail vehicle in dynamic conditions
- effective outline of the rail vehicle (that the vehicle does not exceed the reference profile of the kinematic gauge and structure gauge during stop or running)
- passenger driving comfort
- noise emission to the environment
- emission of vibrations, and shocks to the natural environment
- wear of wheels and rails, as well as wear of the railway surface ballast
- the frequency of repairs of the railway infrastructure and the rail vehicle, etc.

It can be drawn a conclusion that the more precisely the outer outline of the wheel rim (wheels) and the outline of the rail profile are made, the greater the guarantee of smaller (negative) effects of the wheel-rail interaction is. Another problem is to maintain the geometry of this system for as long as possible so that the stability of dynamic properties during operation can be guaranteed.

The wheel-rail system should be analyzed in two cases::

- in a static system, in the vehicle stationary (case I)
- in the dynamic system while the vehicle is running (case II).

In case I, in the wheel-rail system there are static forces resulting from the maximum mass of the vehicle. The maximum load of the wheelset on the track P_0 results from the gross weight of the vehicle, and from this the static pressure of the wheel on the rail Q_0 .

The basis for strength calculations, i.e. the static and fatigue strength of many load-bearing elements of rail vehicles is the static force $P_0=2Q_0$, such as for example:

- bogie frame with welded parts (according to PN-EN 13794:2011 [9])
- axle of a wheelset of a rolling and driving vehicle (according to PN-EN 13103:2018 [3])
- monoblock wheel (PN-EN 13979-1+A2:2011 [10] and UIC leaflet 510-5 [16]) etc.

The basis for the criteria for assessing the vehicle's impact on the track and dynamic properties is also the static force of the vertical pressure of the wheelset on the track $P_0=2Q_0$. In accordance with the European standard PN-EN 14363+A1:2019 [11] and previous editions, e.g. the sum of the transverse forces $\Sigma Y_{j,MAX}=Y_{j1}+Y_{j2}$, or the bearing force $H_{j,MAX}$ are functions of the force P_0 or Q_0 . The adoption of such a principle results in greater readability of the provisions and their better understanding.

Both above-mentioned items are worn as a result of cooperation in the wheel-rail system. Rail wear is as a

ny(CEN).

Układ koło-szyna ma wpływ na następujące czynniki związane z ruchem kolejowym:

- bezpieczeństwo jazdy pojazdu szynowego w warunkach quasi-statycznych
- bezpieczeństwo jazdy pojazdu szynowego w warunkach dynamicznych
- efektywny zarys pojazdu szynowego (żeby pojazd w czasie postoju lub w trakcie jazdy nie przekraczał zarysu odniesienia skrajni kinematycznej oraz skrajni budowli)
- komfort jazdy pasażerów
- emisję hałasu do środowiska naturalnego
- emisję drgań, wibracji i wstrząsów do środowiska naturalnego
- zużycie kół oraz szyn, jak również zużycie podsypki nawierzchni kolejowej
- częstotliwość napraw infrastruktury kolejowej oraz pojazdu szynowego itd.

Można wyciągnąć wniosek, że im dokładniej wykonany jest zarys zewnętrzny wieńca koła (kół) oraz zarys profilu szyny, tym większa jest gwarancja mniejszych (negatywnych) skutków oddziaływania koło-szyna. Kolejnym problemem jest utrzymanie geometrii tego układu przez możliwie długi czas tak, aby można było zagwarantować stabilność własności dynamicznych w czasie eksploatacji.

Układ koło-szyna należy analizować w dwóch przypadkach:

- w układzie statycznym, w stanie spoczynku pojazdu (przypadek I)
- w układzie dynamicznym podczas jazdy pojazdu (przypadek II).

W przypadku I w układzie koło-szyna działają siły statyczne, wynikająca z maksymalnej masy pojazdu. Z masy brutto pojazdu wynika maksymalny nacisk zestawu kołowego na tor P_0 , a z niego nacisk statyczny koła na szynę Q_0 .

Bazą do obliczeń wytrzymałościowych, tzn. wytrzymałości statycznej oraz zmęczeniowej wielu elementów nośnych pojazdów szynowych jest siła statyczna $P_0=2Q_0$, takich jak np.:

- rama wózka wraz z częściami przyspawanymi (wg PN-EN 13794:2011 [9])
- oś zestawu kołowego pojazdu tocznego oraz napędnego (wg PN-EN 13103:2018 [3])
- koło monoblokowe (PN-EN 13979-1+A2:2011 [10] oraz karta UIC 510-5 [16]) itd.

Bazą dla kryteriów oceny oddziaływania pojazdu na tor oraz własności dynamicznych jest również siła statyczna nacisku pionowego zestawu kołowego na tor $P_0=2Q_0$. Zgodnie z normą europejską PN-EN 14363+A1:2019 [11] i poprzednimi edycjami np. suma sił poprzecznych $\Sigma Y_{j,MAX}=Y_{j1}+Y_{j2}$, czy też siła łożyskowa $H_{j,MAX}$ są funkcjami siły P_0 lub Q_0 . Przyjęcie takiej zasady skutkuje większą czytelnością przepisów i ich lepszym zrozumieniem.

result of cooperation with the wheel (starting, braking, friction due to wheel rotation, wheel slide, etc.) and by atmospheric corrosion. On the other hand, the wear of the wheel rim is the result of cooperation with the rail. Besides the friction processes mentioned above, it is the result of braking with block brake inserts (GG, K and L or LL inserts) and in the case of freight wagons, cooperation with track brakes of various types and winch wheels on the hump, etc.

Atmospheric corrosion processes also contribute to the propagation of wear. Thus, the wear processes depend on the coefficient of friction in the wheel-rail system. The friction coefficient is a stochastic value during the operation process, depending on the ambient temperature and humidity, the degree of contamination in the system, the use of sand during the braking process and flange lubrication devices (traction vehicles). Undoubtedly, the profile of the rail head and the outline of the wheel rim must be properly matched so that the wear process is as small as possible of all possible scenarios.

The outline of the wheel rim in the new condition should comply with PN-EN 13715+A1:2011 [8] and UIC 510-2 leaflet [15]. The wear of the outline of the outer rim of a wheel can be divided into two zones: wear of the rim and wear of the wheel tread. The optimal process would be to evenly wear the wheel tread and flanges. Excessive wear of the wheel tread increases the thickness of the flange and the height of the flange and leads to the exceeding of the permissible criterion of the thickness of both wheels of 66 mm (2×33 mm), an increase of "guide width" over 1426 mm and an increase of the flange height ($O_{wmax}=36$ mm).

Excessive wear of the flange causes the exceeding of the permissible minimum thickness of the flange, and thus also the minimum permissible "guide width" ($d=1410$ mm), which, on the one hand, may influence deterioration of the dynamic properties, and, on the other hand, increase the internal and external narrowings of the vehicle and increasing the risk of exceeding the outline of the kinematic gauge and structures. The wear process in the wheel-rail system is very important in the range of a single wheelset, within a two-axle or three-axle running gear and a vehicle. The ideal solution for a vehicle would be that the wear of individual wheels should be even. Such a state is possible only theoretically, although it is certainly possible to take appropriate technical solutions that may lead to the intended goal. One of such solutions is to ensure the similar vertical pressures of all wheelsets (minimal differences) of the vehicle. Measurement of vertical pressures should be performed on „TENSAN” measuring wagons, which are capable of testing the hysteresis loop of primary suspension.

W wyniku współpracy w układzie koła-szyna następuje zużycie obydwu ww. elementów. Zużycie szyny powstaje w wyniku współpracy z kołem (rozruch, hamowanie, tarcie wskutek obrotu koła, poślizgi koła itd.) oraz w wyniku działania korozji atmosferycznej. Natomiast zużycie wieńca koła jest wynikiem współpracy z szyną. Oprócz procesów tarcia, wymienionych wyżej, jest rezultatem hamowania wstawkami hamulca klockowego (wstawki GG, K oraz L lub LL) oraz w przypadku wagonów towarowych współpracy z hamulcami torowymi różnych typów oraz kółkami wciągarki na górcie rozrządowej itd.

Procesy korozji atmosferycznej przyczyniają się również do propagacji zużycia. Procesy zużycia zależą więc od współczynnika tarcia w układzie koło-szyna. Współczynnik tarcia jest wielkością stochastyczną podczas procesu eksploatacji, zależną od temperatury i wilgotności otoczenia, stopnia zanieczyszczenia w układzie, użyciem piasku podczas procesu hamowania i urządzeń smarowania obrzeża (pojazdy trakcyjne). Niewątpliwie profil główki szyny oraz zarys wieńca koła muszą być odpowiednio dopasowane, aby proces zużycia był możliwie najmniejszy ze wszystkich możliwych scenariuszy.

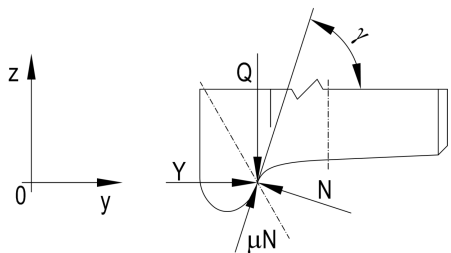
Zarys wieńca koła w stanie nowym powinien być zgodny z PN-EN 13715+A1:2011 [8] oraz kartą UIC 510-2 [15]. Zużycie zarysu zewnętrznego wieńca koła można podzielić na dwie strefy: zużycie obrzeża oraz zużycie powierzchni tocznej koła. Optymalnym procesem byłoby równomierne zużycie powierzchni tocznej oraz obrzeży kół. Nadmierne zużycie powierzchni tocznej, zwiększona grubość obrzeża oraz wysokość obrzeża i doprowadza do przekroczenia dopuszczalnego kryterium grubości obydwu kół 66 mm (2×33 mm), zwiększenia „szerokości prowadnej” ponad 1426 mm oraz zwiększenia wysokości obrzeża ($O_{wmax}=36$ mm).

Nadmierne zużycie obrzeża powoduje przekroczenie wymiaru dopuszczalnego minimalnej grubości obrzeża, a za tym również minimalnej dopuszczalnej „szerokości prowadnej” ($d=1410$ mm), co z jednej strony może wpłynąć na pogorszenie własności dynamicznych, a z drugiej strony na zwiększenie zwężeń wewnętrznych i zewnętrznych pojazdu i zwiększenie ryzyka przekroczenia zarysu skrajni kinematycznej oraz budowli. Proces zużycia w układzie koło-szyna ma bardzo duże znaczenie w zakresie pojedynczego zestawu kołowego, w obrębie dwuosioowego lub trójosiowego układu biegowego oraz pojazdu. Idealnym rozwiązaniem dla pojazdu byłoby, aby zużycie poszczególnych kół było równomierne. Stan taki jest możliwy tylko teoretycznie, choć na pewno można podjąć odpowiednie rozwiązania techniczne, które mogą prowadzić do zamierzonego celu. Jednym z takich rozwiązań jest zapewnienie zbliżonych nacisków pionowych wszystkich zestawów kołowych (minimalnych różnic) pojazdu. Pomiar nacisków pionowych powinien odbywać się na wagach pomiarowych

2. INTERACTION IN WHEEL - RAIL SYSTEM

2.1. General knowledge

The forces generated in the wheel-rail system are shown in Fig.1.



Rys. 1. Siły działające w układzie koło-szyna
Fig. 1. Forces acting in the wheel-rail system

Legenda/Legend:

Q - chwilowa wartość pionowa nacisku koła na szynę/ momentary vertical value of the wheel pressure on the rail,

Y - chwilowa wartość poprzeczna działająca na szynę/ momentary lateral value acting on the rail

μ - współczynnik tarcia w układzie koło-szyna, wartość stochastyczna/friction coefficient in the wheel-rail system, stochastic value

μN - siła tarcia działająca na obrzeże koła/ friction force acting on the wheel flange

N - chwilowa siła normalna/momentary normal force

γ - kąt pochylenia obrzeża (wartość zmieniająca się w trakcie eksploatacji w wyniku zużycia)/ flange inclination angle (value changing during operation as a result of wear)

O, z, y - układ współrzędnych./coordinate system

As a result of the interaction of the wheel and rail and the generated forces, the running surface and the flange of the wheel, as well as the running surface and side head of the rail are worn. The second phenomenon that is related to wear is the gradual reduction of the fatigue strength (fatigue limit of the rail structure). Therefore, the key issue is the appropriate selection of the materials of the wheel-rail friction pair to meet the expected durability requirements for monoblock wheels and railway rails, which are elements of the infrastructure.

2.2. Chemical composition and strength properties of steel grades used for monoblock wheels

According to the European standard PN-EN 13262+A2:2011[6] monoblock wheels, rolled-forged wheels with a heat-treated rim, made of steel ER6, ER7, ER8 and ER9, are authorized for using in rail vehicles, the chemical composition of which is given in the table. The wheels are divided into two categories 1 and 2. Category 1 is for vehicles adapted to speeds above 200 km/h, but category 2 is for vehicles adapted to speeds below or equal 200 km/h.

„TENSAN”, które mają możliwość badania pętli histerezy usprężynowania pierwszego stopnia.

2. ODDZIAŁYWANIE W UKŁADZIE KOŁO-SZYNA

2.1. Ogólny stan wiedzy

Siły powstające w układzie koło-szyna są przedstawione na rys. 1.

W wyniku współpracy koła i szyny i powstających sił, dochodzi do zużycia powierzchni toczonej i obrzeża koła oraz powierzchni toczonej i bocznej główki szyny. Drugim zjawiskiem, które wiąże się ze zużyciem jest stopniowe zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej (granicy zmęczenia konstrukcji szyny). W związku z tym kluczowym zagadnieniem jest odpowiedni dobór materiałów pary ciernej koło-szyna, aby spełnić oczekiwane wymagania trwałości kół monoblokowych oraz szyn kolejowych, które są elementem infrastruktury.

2.2. Skład chemiczny i własności wytrzymałościowe gatunków stali stosowanych na koła monoblokowe

Zgodnie z normą europejską PN-EN 13262+A2:2011[6] do eksploatacji w pojazdach szynowych są dopuszczone koła monoblokowe, walcowane-kute z wieńcem ulepszanym cieplnie wykonane ze stali ER6, ER7, ER8 i ER9, których skład chemiczny jest podany w tablicy 1. Koła są podzielone na dwie kategorie 1 i 2. Kategoria 1 jest przeznaczona dla pojazdów, przystosowanych do prędkości powyżej 200 km/h, natomiast kategoria 2 dla pojazdów, przystosowanych do prędkości mniejszych lub równych 200 km/h.

Skład chemiczny gatunków stali używanych na koła monoblokowe wg PN-EN 13262+A2:2011 [6]

Tablica 1

Chemical composition of steel grades used for monoblock wheels under PN-EN 13262+A2:2011 [6]

Table 1

^A dla poszczególnych zastosowań można ustalić odstępstwa dla maksymalnych wartości/ the deviations for the maximum values can be established for individual applications

^B maksymalną zawartość fosforu 0,025% można podać w ofercie lub w zamówieniu/ the maximum phosphorus content of 0.025% can be specified in the offer or in the order

^C minimalną zawartość siarki można podać w ofercie lub w zamówieniu, zgodnie z procesem wytwarzania stali, aby zabezpieczyć stal przed pękaniem wodorowym/ the minimum sulfur content can be specified in the offer or in the order according to the steelmaking process, to protect the steel from hydrogen cracking.

Gatunek stali/Steel grade	Maksymalny udział procentowy pierwiastków [%] ^A Maximum percentage of elements [%] ^A										
	C	Si	Mn	P ^B	S ^{BC}	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Cr+Mo+Ni
ER6	0,48	0,40	0,75	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER7	0,52	0,40	0,80	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER8	0,56	0,40	0,80	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER9	0,60	0,40	0,80	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50

The strength properties of steel grades used for monoblock wheels are presented in Table 2.

Własności wytrzymałościowe gatunków stali, stosowanych na koła monoblokowe są przedstawione w tabelicy 2.

Własności wytrzymałościowe gatunków stali, stosowanych na koła monoblokowe pojazdów szynowych wg PN-EN 13262+A2:2011[6]

Tablica 2

The strength properties of steel grades used for monoblock wheels of rail vehicles under PN-EN 13262+A2:2011[6]

Table 2

Oznaczenie stali/ Steel marking	Tarcza koła/Wheel disc			Wieniec koła/ Wheel rim	
	$R_{eH}[\%]^a$	$R_m[\text{MPa}]$	$A_5[\%]$	Dopuszczalna redukcja R_m [MPa] ^b	$A_5[\%]$
ER6	≥ 500	780/900	≥ 15	≥ 100	≥ 16
ER7	≥ 520	820/940	≥ 14	≥ 110	≥ 16
ER8	≥ 540	860/980	≥ 13	≥ 120	≥ 16
ER9	≥ 580	900/1050	≥ 12	≥ 130	≥ 14

a) jeśli nie podano granicy plastyczności, należy posługiwać się $R_{p0,2}$ /if the yield point is not given $R_{p0,2}$ should be used

b) redukcja doraźnej wytrzymałości na rozciąganie odnosi się do całej tarczy koła/ the reduction of the immediate tensile strength applies to the entire disc of the wheel

The minimum hardness measured in degrees of Brinell for monoblock wheel rims for individual steel grades is given in Table 3.

Minimalna twardość, mierzona w stopniach Brinella dla wieńców kół monoblokowych dla poszczególnych gatunków stali jest podana w tabelicy 3.

Minimalna twardość, mierzona w stopniach Brinella dla wieńców kół monoblokowych dla poszczególnych gatunków stali wg PN-EN 13262+A2:2011 [6]

Tablica 3

The minimum hardness measured in degrees of Brinell for monoblock wheel rims for individual steel grades under PN-EN 13262+A2:2011 [6]

Table 3

L.p./ No.	Gatunek stali/ Steel grade	Minimalna wartość twardości, mierzona w skali Brinella [HBW]/ Minimum value of hardness measured in degrees of Brinell	
		Kategoria 1 (koła przeznaczone dla pojazdów przeznaczonych dla prędkości powyżej 200 km/h)/ Category 1 (wheels intended for vehicles designed for speeds above 200 km/h)	Kategoria 2 (koła przeznaczone dla pojazdów dla prędkości powyżej 200 km/h)/ Category 2 (wheels intended for vehicles for speeds above 200 km/h)
1	ER6	-	225
2	ER7	245	235
3	ER8	245	245
4	ER9	-	255

The average and minimum values of impact strength for individual steel grades used for monoblock wheels for rail vehicles are given in Table 4.

Średnie i minimalne wartości udarności dla poszczególnych gatunków stali, stosowanych na koła monoblokowe dla pojazdów szynowych są podane w tabelicy 4.

Średnie i minimalne wartości udarności dla gatunków stali, stosowanych na koła monoblokowe pojazdów szynowych wg PN-EN 13262+A2:2011 [6]

Tablica 4

The average and minimum values of impact strength for individual steel grades used for monoblock wheels for rail vehicles under PN-EN 13262+A2:2011[6]

Table 4

Oznaczenie stali/ Steel marking	Udarność w [J], mierzona w temperaturze 20°C/ Impact strength in [J], measured in temperature of 20°C		Udarność w [J], mierzona w temperaturze -20°C/ Impact strength in [J], measured in temperature of -20°C	
	wartość średnia/average value	wartość minimalna/minimum value	wartość średnia/average value	wartość minimalna/minimum value
ER6	≥ 17	≥ 12	≥ 12	≥ 8
ER7	≥ 17	≥ 12	≥ 10	≥ 8
ER8	≥ 17	≥ 12	≥ 10	≥ 5
ER9	≥ 13	≥ 9	≥ 8	≥ 5

2.3. Chemical composition and strength properties of steel grades used for railway rails

Steel grades used for railway rails, their chemical composition and strength properties are given in the European standard PN-EN 13674+A1:2017 [7].

For comparison, the chemical composition of individual steel grades used for the railway rails is presented in Table 5.

2.3. Skład chemiczny i własności wytrzymałościowe gatunków stali, stosowanych na szyny kolejowe

Gatunki stali, stosowane na szyny kolejowe, ich skład chemiczny oraz własności wytrzymałościowe są podane w normie europejskiej PN-EN 13674+A1:2017 [7].

Dla porównania skład chemiczny dla poszczególnych gatunków stali używanych na szyny kolejowe jest przedstawiony w tabelicy 5.

Skład chemiczny gatunków stali używanych na szyny wg PN-EN 13674+A1:2017[7]
Chemical composition of steel grades used for rails under PN-EN 13674+A1:2017[7]

Tablica 5
Table 5

Gatunek stali/ Steel grade		Maksymalny udział procentowy pierwiastków [%] Maximum percentage of elements [%]								
Nazwa stali/ Steel name	Próbka/ Sample	C	Si	Mn	P _{MAX}	S _{max}	Cr	Al _{max}	V _{max}	N _{max}
R200	ciekła/ liquid	0,40±0,60	0,15±0,58	0,70±1,20	0,035	0,035	≤ 0,15	0,004	0,030	0,009
	stała/solid	0,38±0,62	0,13±0,60	0,65±1,25	0,040	0,040	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010
R220	ciekła/ liquid	0,50±0,60	0,20±0,60	1,00±1,25	0,025	0,025	≤ 0,15	0,004	0,030	0,009
	stała/solid	0,48±0,62	0,18±0,62	0,95±1,30	0,030	0,030	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010
R260	ciekła/ liquid	0,62±0,80	0,15±0,58	0,70±1,20	0,025	0,025	≤ 0,15	0,004	0,030	0,009
	stała/solid	0,60±0,82	0,13±0,60	0,65±1,25	0,030	0,030	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010
R260Mn	ciekła/ liquid	0,55±0,75	0,15±0,60	1,30±1,70	0,025	0,025	≤ 0,15	0,004	0,030	0,009
	stała/solid	0,53±0,77	0,13±0,62	1,25±1,75	0,030	0,030	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010
R320 Cr	ciekła/ liquid	0,60±0,80	0,50±1,10	0,80±1,20	0,020	0,025	0,80±1,20	0,004	0,18	0,009
	stała/solid	0,58±0,82	0,48±1,12	0,75±1,25	0,025	0,030	0,75±1,25	0,004	0,18	0,010
R350HT	ciekła/ liquid	0,72±0,80	0,15±0,58	0,70±1,20	0,020	0,025	≤ 0,15	0,004	0,030	0,009
	stała/solid	0,70±0,82	0,13±0,60	0,65±1,25	0,025	0,030	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010
R350LHT	ciekła/ liquid	0,72±0,80	0,15±0,58	0,70±1,20	0,020	0,025	≤ 0,30	0,004	0,030	0,009
	stała/solid	0,70±0,82	0,13±0,60	0,65±1,25	0,025	0,030	≤ 0,30	0,004	0,030	0,010
R370CrHT	ciekła/ liquid	0,70±0,82	0,40±1,00	0,70±1,10	0,020	0,020	0,40±0,60	0,004	0,030	0,009
	stała/solid	0,68±0,84	0,38±1,02	0,65±1,15	0,025	0,025	0,35±0,65	0,004	0,030	0,010
R400HT	ciekła/ liquid	0,90±1,05	0,20±0,60	1,00±1,30	0,020	0,020	≤ 0,30	0,004	0,030	0,009
	stała/solid	0,88±1,07	0,18±0,62	0,95±1,35	0,025	0,025	≤ 0,30	0,004	0,030	0,010

The percentage composition of the alloying elements for individual steel grades used for railway rails is given in Table 6.

Procentowy skład pierwiastków stopowych dla poszczególnych gatunków stali, stosowanych na szyny kolejowe jest podany uzupełniająco w tablicy 6.

Skład chemiczny gatunków stali używanych na szyny wg PN-EN 13674+A1:2017 [7]
Chemical composition of steel grades used for rail under PN-EN 13674+A1:2017 [7]

Tablica 6
Table 6

L.p./No.	Gatunek Stali Steel grade	Mo	Ni	Cu	Sn	Sb	Ti	Nb	Cu+10Sn	Pozostałe/ The others
		Skład chemiczny w [%] Chemical composition in [%]								
1	R200, R220 R260 R260Mn	0,02	0,10	0,15	0,030	0,020	0,025	0,01	0,035	0,35•(Cr+Mo +Ni+Cu+V)
2	R320Cr	0,02	0,10	0,15	0,030	0,020	0,025	0,01	0,035	0,16•(Ni +Cu)
3	R350HT	0,02	0,10	0,15	0,030	0,020	0,025	0,04	0,035	0,25•(Cr+Mo +Ni+Cu+V)
4	R350LHT R370CrHT R400HT	0,02	0,10	0,15	0,030	0,020	0,025	0,04	0,035	0,20•(Mo+Ni+ Cu+V)

The additional properties concerning the chemical composition of the individual above-mentioned steel grades with regard to the content of oxygen and hydrogen are presented in Table 7.

Dodatkowe własności, dotyczące składu chemicznego poszczególnych ww. gatunków stali z uwagi na zawartość tlenu i wodoru są przedstawione w tablicy 7.

Zawartość tlenu i wodoru dla gatunków stali, stosowanych na szyny kolejowe wg PN-EN 13674+A1:2017 [7] Tablica 7
Content of oxygen and hydrogen for steel grades used for railway rails under PN-EN 13674+A1:2017 [7] Table 7

L.p./No.	Gatunek stali/ Steel grade	Oznaczenie cyfrowe w rejestrze komputerowym stali/ Digital designation in the computer register of steel	Zawartość O (tlenu) w 10 ⁻⁴ % [ppm]/ Content of O (oxygen) in 10 ⁻⁴ %	Zawartość H (wodoru) w 10 ⁻⁴ % [ppm]/ Content H (hydrogen) in 10 ⁻⁴ % [ppm]	Uwagi/Comments
1.	R200	1.0521	20	3,0	stal niestopowa (Cr-Mn), nieobrobiona cieplnie/ unalloyed steel (Cr-Mn), heat untreated
2.	R220	1.0524	20	3,0	stal niestopowa, Cr-Mn, nieobrobiona cieplnie/ unalloyed steel (Cr-Mn), heat untreated
3.	R260	1.0623	20	2,5	stal niestopowa (Cr-Mn), nieobrobiona cieplnie/ unalloyed steel (Cr-Mn), heat untreated
4.	R260Mn	1.0624	20	2,5	stal niestopowa (Cr-Mn), nieobrabiana cieplnie/ unalloyed steel (Cr-Mn), heat untreated
5.	R320Cr	1.0915	20	2,5	stal stopowa (1% Cr), nieobrabiana cieplnie/ alloyed steel (1% Cr), heat untreated
6.	R350 HT	1.0631	20	2,5	stal niestopowa, obrabiana cieplnie/ unalloyed steel, heat treated
7.	R350 LHT	1.0632	20	2,5	stal niestopowa, obrabiana cieplnie/ unalloyed steel, heat treated
8.	R370CrHT	1.0992	20	1,5	stal stopowa, obrabiana cieplnie/ alloyed steel, heat treated
9.	R400 HT	1.1254	20	1,5	stal stopowa, obrabiana cieplnie/ alloyed steel, heat treated

The strength properties of individual steel grades used for railway rails are presented in Table 8.

Własności wytrzymałościowe poszczególnych gatunków stali, stosowanych na szyny kolejowe są przedstawione w tablicy 8.

Własności wytrzymałościowe gatunków stali używanych do produkcji szyn kolejowych wg PN-EN 13674+A1:2017 [7]

Tablica 8

The strength properties of steel grades used for production of railway rails under PN-EN 13674+A1:2017 [7]

Table 8

L.p./No.	Gatunek stali/ Steel grade	Minimalna wytrzymałość na rozciąganie R _m [MPa]/ Minimum tensile strength R _m [MPa]	Wydłużenie [%]/ Elongation [%]	Twardość na powierzchni jezdnej główki szyny mierzona w stopniach Brinella [HBW]/ Hardness on the running surface of the rail head measured in degrees Brinell [HBW]/
1.	R200	680	14	200+240
2.	R220	770	12	220+260
3.	R260	880	10	260+300
4.	R260Mn	880	10	260+300
5.	R320Cr	1080	9	320+360
6.	R350 HT	1175	9	350+390
7.	R350 LHT	1175	9	350+390
8.	R370CrHT	1280	9	370+410
9.	R400 HT	1280	8	400+440

The impact strength values for individual grades are presented in Table 9.

Wartości udarności dla poszczególnych gatunków są przedstawione w tablicy 9.

Wartości udarności dla poszczególnych gatunków stali, stosowanych na szyny kolejowe wg PN-EN 13674+A1:2017 [7]

Impact strength values for individual steel grades used for railway rails under PN-EN 13674+A1:2017 [7]

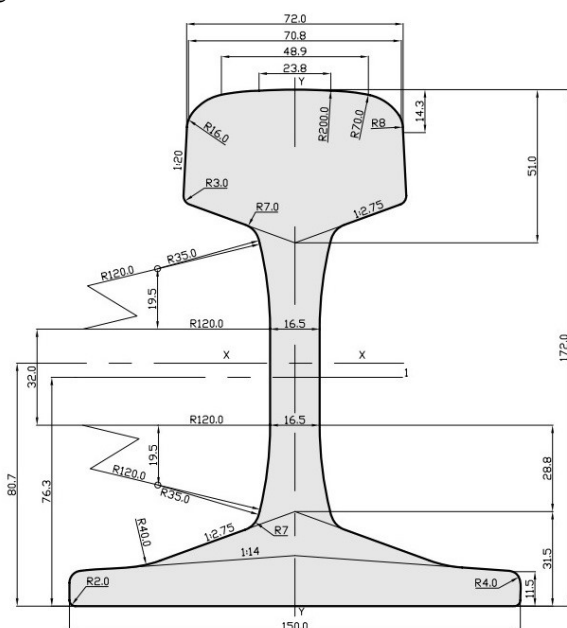
Tablica 9

Table 9

L.p./No.	Gatunki stali/Steel grade	Pojedyncza minimalna wartość udarności K _{1C} [MPa•m ^{1/2}]/ Single minimum value of impact strength K _{1C} [MPa•m ^{1/2}]	Minimalna średnia wartość udarności K _{1C} [MPa•m ^{1/2}]/ Minimum average value of impact strength K _{1C} [MPa•m ^{1/2}]
1.	R200 i R220	30	35
2.	R260 i R260 Mn	26	29
3.	R320Cr	24	26
4.	R350HT	30	32
5.	R350LH, R370CrHT i R400HT	26	29

An important element in the considerations is the rail profile (external profile). All currently used profiles of railway rails are listed in the PN-EN 13674:2011+A1:2017 standard [7]. These profiles are listed in Table 10.

These profiles were grouped depending on the linear weight per one meter (e.g. profile 46 means a unit weight of 46 kg/m). These profiles are graphically represented with relevant data such as the cross-sectional area, mass per linear meter, moment of inertia in relation to the x-x axis, rail head strength index, rail foot strength index, moment of inertia in relation to y-y axis, strength index in relation to y-y axis. An exemplary 60E1 rail profile is shown in Fig.2



Rys. 2. Profil szyny kolejowej 60E1 (60 kg/m) zgodnie z aneksem A.23 normy europejskiej PN-EN 13674-1+A1:2017 [7]
Fig. 2. Profile of railway rail 60E1 (60 kg/m) according to Annex A.23 of European standard PN-EN 13674-1+A1:2017 [7]

Istotnym elementem w rozważaniach jest profil szyny (zarys zewnętrzny). Wszystkie obecnie stosowane profile szyn kolejowych są wymienione w normie PN-EN 13674:2011+A1:2017 [7]. Profile te wymieniono w tablicy 10.

Profile te pogrupowano w zależności od masy bieżącej, przypadającej na jeden metr (np. profil 46 oznacza masę jednostkową 46 kg/m). Profile te są przedstawione graficznie, wraz z odpowiednimi danymi jak pole przekroju, masa przypadająca na metr bieżący, moment bezwładności względem osi x-x, wskaźnik wytrzymałości główki szyny, wskaźnik wytrzymałości stopy szyny, moment bezwładności względem osi y-y, wskaźnik wytrzymałości względem osi y-y.

Przykładowy profil szyny 60E1 jest przedstawiony na rys. 2.

2.4. Porównanie stali używanych na koła monoblokowe oraz szyny kolejowe

Analizując tablice 1÷4 dotyczące stali, stosowanych na koła monoblokowe pojazdów szynowych oraz tablice 6÷10 dotyczące stali stosowanych na szyny kolejowe można wyciągnąć następujące wnioski:

- stale stosowane na koła monoblokowe mają mniejszą twardość, aniżeli stale przeznaczone do produkcji szyn kolejowych; twardość jest już jest większa dla stali R260, dla której wynosi ona 260÷300 HBW, podczas gdy maksymalna twardość dla stali ER9 wynosi 255 HBW (w przypadku szyn kolejowych chodzi o twardość na powierzchni jezdnej, a w przypadku kół monoblokowych chodzi o twardość na powierzchni zewnętrznej wieńca koła oraz obrzeża); wychodzi się tutaj z założenia, że przy współpracy koło-szyna większemu przyrostowi zużycia ze zrozumiałych względów

Profile (zarysy zewnętrzne) szyn kolejowych wg PN-EN 13674-1:2011+A1:2017 [7]
Profile (external outlines) of railway rails under PN-EN 13674-1:2011+A1:2017 [7]

Tablica 10
Table 10

L.p./No.	Profil 46 (46kg/m)/ Profile 46 (46kg/m)/	Profil 49 (49 kg/m)/ Profile 49 (49 kg/m)	Profil 50 (50 kg/m)/ Profile 50 (50 kg/m)	Profil 52 (52 kg/m)/ Profile 52 (52 kg/m)	Profil 54 (54 kg/m)/Profile 54 (54 kg/m)	Profil (55 kg/m)/Profile (55 kg/m)/	Profil 56 (56 kg/m)/ Profile 56 (56 kg/m)	Profil (60 kg/m)/ Profile (60 kg/m)
1.	46E1 (SBB1)	49E1 (DIN S49)	50E1 (U50E)	52E1 (S2RATP)	54E1 (UIC 54)	55E1 (U55)	56E1 (BS 113lbBR Variant)	60E1 (UIC 60)
2.	46E2 (U33)	49E2 (S49T)	50E2 (50EB-T)		54E2 (UIC54E)			60E2
3.	46E3 (NP46)	49E5	50E3 (BV50)		54E3 (DIN S54)			
4.	46 E4 (46UNI)		50E4 (UIC50)		54E4 (-)			
5.			50E6 (U50)					

Markings in brackets are " previous rail profiles " that appeared for the given profile.

Oznaczenia w nawiasach są profilami "poprzednimi" (ang. „previous rail profiles”), które pojawiły się dla danego profilu.

2.4. Comparison of steels used for monoblock wheels and railway rails

Analyzing tables 1÷4 concerning steel, used for monoblock wheels of rail vehicles and tables 6÷10 concerning steels used for railway rails, the following conclusions can be drawn:

- steels used for monoblock wheels have lower hardness than steels intended for the production of railway rails; the hardness is already higher for R260 steel, for which it is 260÷300 HBW, while the maximum hardness for ER9 steel is 255 HBW (in the case of railway rails it is the hardness on the running surface, and in the case of monoblock wheels it is the hardness on the outer surface of rim and flange of wheel); it is assumed here that in the case of wheel-rail cooperation the wheel should be subjected to the greater increase in wear for obvious reasons,
- in both cases, it has been presented the requirement in the relevant European standards that they must always have a minimum hydrogen content in the steels; the permissible hydrogen content is from **1.5 +3 ppm** depending on the steel grade (Table 7) and so: **3.0 ppm** for steel R200 and R220, **2.5 ppm** for steel R260, R260 Mn, R320Cr, R350HT and R350LHT as well as **1.5 ppm** for steel R370 CrHT and R400HT; while in the case of steels used for monoblock wheels in accordance with the European standard PN-EN 13262+A2:2011 (Table F.1) [6] the hydrogen content is **2 ppm** for wheels of category 1 (vehicle speed $v > 200$ km/h) and **2.5 ppm** for wheels of category 2 (vehicle speed $v \leq 200$ km/h);
- in the case of monoblock wheels, the level of compressive stresses resulting from heat treatment (heat improvement) in the wheel rim is important; the level of these stresses and their distribution is from -150÷-80 MPa in accordance with 3.5.2 of European standard PN-EN 13262+A2:2011 [6]. Disappearance of compressive stress is required at a depth of 35÷50 mm, measuring from the wheel running surface. These stresses play an important role due to the braking process carried out in the block brake insert - wheel running surface. The thermal stresses that arise during braking and the subsequent re-profiling of the contour (reconstructing the profile) of the wheel rim, gradually reduce the compressive stresses during operation, which counteract the initiation of cracks and fatigue cracks. In turn, in the case of steels used for railway rails, the level of residual stresses in the rail foot, which powinno podlegać koło;
- zarówno w jednym jak i drugim przypadku wykazano wymóg w odpowiednich normach europejskich, aby stale posiadały minimalną zawartość wodoru; dopuszczalna zawartość wodoru wynosi od **1,5 +3 ppm**, w zależności od gatunku stali (tablica 7) i tak: **3,0 ppm** dla stali R200 i R220, **2,5 ppm** dla stali R260, R260 Mn, R320Cr, R350HT i R350LHT oraz **1,5 ppm** dla stali R370 CrHT i R400HT; natomiast w przypadku stali używanych na koła monoblokowe zgodnie z normą europejską PN-EN 13262+A2:2011 (tablica F.1) [6] zawartość wodoru wynosi **2 ppm** dla kół kategorii 1 (prędkość pojazdu $v > 200$ km/h) oraz **2,5 ppm** dla kół kategorii 2 (prędkość pojazdu $v \leq 200$ km/h);
- w przypadku kół monoblokowych istotny jest poziom naprężeń ściskających, powstałych w wyniku obróbki cieplnej (ulepszanie cieplne) w wieńcu koła; poziom tych naprężeń oraz ich rozkład wynosi od -150÷-80 MPa zgodnie z p.3.5.2 normy europejskiej PN-EN 13262+A2:2011 [6]. Zanik naprężeń ściskających jest wymagany na głębokości 35÷50 mm, mierząc od powierzchni tocznej koła. Naprężenia te odgrywają istotną rolę z uwagi na proces hamowania realizowany w układzie wstawka hamulca klockowego- powierzchnia toczna koła. Naprężenia cieplne, które powstają podczas hamowania oraz kolejne reprofiliacje zarysu (odtworzenie profilu) wieńca koła, powodują stopniowe zmniejszenie naprężeń ściskających w trakcie eksploatacji, które przeciwdziałają inicjacji rys i pęknięć zmęczeniowych. Z kolei w przypadku stali używanych na szyny kolejowe istotny jest poziom naprężeń szczątkowych w stopie szyny, które powstają na etapie produkcji. Sposób badania tych naprężeń jest określony w załączniku C normy europejskiej PN-EN 13674-1+A1:2017 [7].
- w przypadku szyn kolejowych można stwierdzić, że na etapie wytwarzania istotny jest zawartość tlenu O_2 , który dla wszystkich stali jest dopuszczalny na poziomie max. 20 ppm ($20 \cdot 10^{-4}$ %); również badana jest wielkość odwęglenia na powierzchni jezdnej; maksymalna głębokość odwęglenia dla stali R200 i R220 wynosi 0,28 mm, natomiast dla pozostałych stali 0,25 mm. Określenie kryteriów, związanych z grubością warstwy odwęglonej, w wyniku procesu wywarzania jest o tyle istotne, że wraz ze zmniejszeniem się zawartości węgla w stali maleją własności wytrzymałościowe takie jak granica plastyczności R_e oraz R_m , a tym samym wytrzyma-

arises at the production stage, is important. The method of testing these stresses is specified in Annex C of the European standard PN-EN 13674-1+A1:2017 [7].

- in the case of rails, it can be found that content of O₂ is important at the production stage, which for all steels is permissible at the level of max 20 ppm (20•10⁻⁴ %); also the amount of decarburization on the running surface is tested; the maximum depth of decarburization for steel R200 and R220 is 0.28 mm, while for other steels is 0.25 mm. Determining the criteria related to the thickness of the decarburized layer as a result of the production process is important because strength properties such as the yield point R_e and R_m, and thus the fatigue strength (fatigue limit) decrease with the decrease of the carbon content in the steel.

It is very interesting the comparison of the size of the critical stress intensity coefficient, also defined as “fracture toughness” K_{1c} for steels used for monoblock wheels and for railway rails. The value of the K_{1c} coefficient for steels used for monoblock wheels and for railway rails is presented in Table 11.

As it is resulted from the comparison of the values of the coefficients characterizing the fracture toughness of steel, much higher values of the K_{1c} coefficient are shown by the steels used for monoblock wheels of rail vehicles. This, however, is justified by the provision in point 3.2.5.2 of PN-EN 13262+A2:2011 standard [6], the values of this K_{1c} coefficient are valid for wheels braked with a block brake (regardless of the wheel category). According to the guidelines, the steels of ER6 and ER7 types are used in such vehicles. In this case, thermal stresses appeared on the wheel surface as a result of the braking process. In this case, the wheel is additionally loaded, all the more so because the plastic inserts of the „K” or „LL” type come into service. In the case of using plastic brake blocks (composite materials), practically all the thermal energy resulting from the braking process is emitted towards the wheel rim. It is the result of a relatively bad thermal conductivity in relation to brake inserts made of cast iron (so-called GG inserts according to UIC 832 [17]). Steels of the ER8 and ER9 types are used for monoblock wheels in the case of rail vehicles, which are equipped with a disc brake installed on the wheel discs or on the axles of the rail vehicle.

3. SPECIFICITY OF RAILWAY RAILS WEAR

While wear of wheel is described in the national and foreign regulations and has the common causes in various types of rail transport, the wear of rails is treated individually by the individual railway infrastructure owners.

łość zmęczeniowa (granica zmęczenia).

Bardzo ciekawe jest porównanie wielkości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń, określanego również terminem „odporności na kruche pękanie” K_{1c} dla stali używanych na koła monoblokowe oraz na szyny kolejowe. Wartość współczynnika K_{1c} dla stali, stosowanych na koła monoblokowe oraz na szyny kolejowe jest przedstawiona w tablicy 11.

Zestawienie wartości minimalnych współczynnika K_{1c} dla gatunków stali stosowanych na szyny kolejowe oraz koła monoblokowe pojazdów szynowych wg odpowiednio PN-EN 13674+A1:2017 [7] oraz PN-EN 13262+A2:2011 [6] Tablica 11

List of the minimum values of the K_{1c} coefficient for steel grades used for rail rails and monoblock wheels of rail vehicles according to PN-EN 13674+A1:2017 [7] and PN-EN 13262+A2:2011 respectively [6] Table 11

L.p. / No	Gatunek stali/ Steel grade	Minimalna pojedyncza wartość współczynnika K _{1c} [MPa•m ^{1/2}]/ Minimum single value of coefficient K _{1c} [MPa•m ^{1/2}]/	Minimalna wartość średnia współczynnika K _{1c} [MPa•m ^{1/2}]/ Minimum average value of coefficient K _{1c} [MPa•m ^{1/2}]
Gatunki stali używanych na szyny kolejowe/ Steel grades used for railway rails			
1.	R200 i R220	30	35
2.	R260 i R260Mn	26	29
3.	R320Cr	24	26
4.	R350HT	30	32
5.	R350LHT, R370CrHT, R400HT	26	29
Gatunki stali używanych na koła monoblokowe pojazdów szynowych/ Steel grades used for monoblock wheels of rail vehicles			
1.	ER6	100	80
2.	ER7	80	70

Jak wynika z porównania wartości współczynników, charakteryzujących odporność stali na pękanie, znacznie większe wartości współczynnika K_{1c} wykazują stale stosowane na koła monoblokowe pojazdów szynowych. Uzasadnia to jednak zapis w p.3.2.5.2 normy PN-EN 13262+A2:2011 [6], wartości tego współczynnika K_{1c} obowiązują dla kół hamowanych hamulcem klockowym (niezależnie od kategorii koła). Zgodnie z wytycznymi stosuje się w takich pojazdach stale typu ER6 i ER7. W takim przypadku w wyniku procesu hamowania na powierzchni koła tworzą się naprężenia cieplne. Koło jest w takim przypadku dodatkowo obciążone, tym bardziej że do eksploatacji wchodzi wstawki z tworzywa sztucznego typu „K” lub „LL”. W przypadku zastosowania wstawek hamulcowych z tworzyw sztucznych (materiałów kompozytowych) praktycznie cała energia cieplna, wynikająca z procesu hamowania, emituje w kierunku wieńca koła. Jest to wynik relatywnie złej przewodności cieplnej w stosunku do wstawek hamulcowych wykonanych z żeliwa (tzw. wstawki GG

The maximum wear of the wheels is limited by the following factors:

- minimum thickness of wheel rim
- minimum thickness of the wheel flange
- minimum allowable flange steepness $q_R=6,5$ mm; in case of exceeding this dimension $q_R < 6,5$ mm, there may be difficulties related to passing through the turnout, i.e. the wheel flange may come into contact with the switch blade
- the possibility of exceeding the outline of the kinematic gauge by the sprung / unsprung parts of the vehicle and possible collisions with fixed devices of the railway infrastructure (regulations according to PN-EN 15273-1+A1:2017 [12], PN-EN 15273-2+A1:2017 [13] and PN-EN 15273+A1:2017 [14])
- exceeding the dimension of the "guide" width of a wheelset over the permissible range $d=1410\div 1426$ mm
- the possibility of improper cooperation of the wheel with elements of the railway infrastructure or with fixed devices mounted on the railway infrastructure, etc.

The maximum wear of the rails is defined as the effect of two wears i.e. wears in the vertical direction a_h and wear in the lateral direction a_s of the profile (for rails of type 46E1,54E2,54E6 i 60E1/60E2). In order to identify what factors influence rail wear, the tests focused on cooperation with the wheel having the profile of S1002. While performing all tests of the rail wear, it was noticed that the degree of wear in this case depends on the track location in large degree.

The location of the track is related to the following parameters that influence the wear of the rails, such as:

- system of forces of the wheelset of the rail vehicle acting on the track
- set of passenger and freight trains
- local radius of track curve
- speed of the rail vehicle (s).

On railway routes where there is so-called mixed traffic, the experimental measurements were made, from which it results that the load of the rails is stochastic. Such measurements were carried out on a straight track in Cresciano (southern Switzerland). The vertical dynamic pressure of wheel on the 60E1 rail with rail sleepers B70W was measured for vehicles riding at a speed of $v_{max}=140$ km/h. It is resulted from them that the maximum of vertical load on the rail is the result of the passage of heavy locomotives and freight trains in loaded condition, while the appropriate minimum is the result of the passage of light freight and passenger trains. The static loads, which in the case of light passenger trains and multiple units have an average value of 11.3t with a standard deviation of 2.8 t and for heavy locomotives

wg karty UIC 832 [17]). Stale typu ER8 oraz ER9 są stosowane na koła monoblokowe w przypadku pojazdów szynowych, które są wyposażone w hamulec tarczowy zainstalowany na tarczach kół lub na osiach pojazdu szynowego.

3. SPECYFIKA ZUŻYCIA SZYN KOLEJOWYCH

O ile zużycie koła jest opisane w przepisach krajowych oraz zagranicznych i ma wspólne przyczyny w różnych rodzajach transportu kolejowego o tyle zużycie szyn jest traktowane indywidualnie przez poszczególnych właścicieli infrastruktury kolejowej.

Maksymalne zużycie kół jest ograniczone przez następujące czynniki:

- minimalną grubość wieńca koła
- minimalną grubość obrzeża koła
- minimalną dopuszczalną stromość obrzeża $q_R=6,5$ mm; w przypadku przekroczenia tego wymiaru $q_R < 6,5$ mm, mogą występować trudności związane z przejazdem przez rozjazd, tzn. obrzeże koła może wejść w kontakt z iglicą rozjazdu
- możliwość przekroczenia zarysu skrajni kinematycznej przez części usprężynowane/nieusprężynowane pojazdu i ewentualne kolizje z urządzeniami stałymi infrastruktury kolejowej (przepisy wg PN-EN 15273-1+A1:2017 [12], PN-EN 15273-2+A1:2017 [13] i PN-EN 15273+A1:2017 [14])
- przekroczenie wymiaru szerokości „prowadnej” zestawu kołowego ponad dopuszczalny zakres $d=1410\div 1426$ mm
- możliwość niewłaściwej współpracy koła z elementami infrastruktury kolejowej lub z urządzeniami stałymi zamontowanymi na infrastrukturze kolejowej itd.

Maksymalne zużycie szyn jest definiowane jako efekt dwóch zużyć tzn. zużycia w kierunku pionowym a_h oraz zużycia w kierunku poprzecznym a_s profilu (dla szyn typu 46E1,54E2,54E6 i 60E1/60E2). W celu zidentyfikowania jakie czynniki mają wpływ na zużycie szyny badania koncentrowały się na współpracy z kołem posiadającym profil S1002. Podczas wykonywania wszystkich badań zużycia szyn, zauważono, że stopień zużycia w tym przypadku zależy w dużym stopniu od lokalizacji toru.

Z lokalizacją toru związane są takie parametry, wpływające na zużycie szyn kolejowych, jak:

- układ sił zestawu kołowego pojazdu szynowego, działającego na tor
- skład pociągów osobowych oraz towarowych
- lokalny promień łuku toru
- prędkość pojazdu szynowego (pojazdów).

Na trasach kolejowych, gdzie występuje tzw. ruch mieszany dokonano pomiarów doświadczalnych, z

and freight wagons of 20.4 t and a standard deviation of 1.4 t, result from the measured dynamic forces of the vertical pressure on the track.

The study [1] gives the rail wear index (outer rail on the curve) as the ratio of both types of wear, i.e. a_s/a_h and so:

- 1/0: no side wear of the rails,
- 1/2: side wear and higher life at height,
- 1/3: significant side wear and moderate altitude wear,
- 1/4: significant side wear and almost negligible altitude wear.

The rail wear propagation depends on the curve radius of the track in connection with the gross pressure, for example.:

- $a_s/a_h=1/3$ for track curve radii of $R \leq 300$ m,
- $a_s/a_h=1/2$ for the curve radius range of $300 \text{ m} < R < 1000$ m,
- $a_s/a_h=1/0$ for curves with track radius of $R > 1000$ m.

a_s/a_h index describes the loss of the rail cross-sectional area and reduces the strength index. Therefore, the summary index i.e. $k=a_s+a_h$ is often used to describe the wear area. The wear for the individual rails UIC 60E, 54E and 46E is given in Table 12.

Równania opisujące zużycia szyn 46E,54E oraz 60E, ustalone doświadczalnie wg [1] **Tablica 12**
Equations describing the wear of rails 46E,54E and 60E determined experimentally according to[1] **Table 12**

Rodzaj profilu/ Type of profile	Równanie/ Equation
UIC 60E	$A_{60E} = -0,07414 \cdot k^2 + 38,552 \cdot k - 21,433$
UIC 54E	$A_{54E} = -0,05999 \cdot k^2 + 35,162 \cdot k - 14,399$
UIC 46E	$A_{46E} = -0,08141 \cdot k^2 + 37,774 \cdot k - 4,373$

4. CONCLUSIONS

1. From the carried out analysis it appears that the wheel-rail system is technically very complicated, on the one hand it still requires a lot of studies and experimental research in order to increase the reliability, availability and profitability of the rolling stock and railway infrastructure, and on the other hand it requires the position of railway transport on the passenger and cargo transport market. At the time when the separation of railway infrastructure from the carriers using it has been ordered, it is therefore necessary for both sectors to cooperate. In the case of monoblock wheels of rail vehicles and railway rails, the decisive parameters are the fatigue strength and wear. Both carriers and infrastructure owners strive to obtain the greatest possible service life of

których wynika że obciążenie szyn ma charakter stochastyczny. Pomiary takie zostały przeprowadzone na torze prostym w Cresciano (południowa Szwajcaria). Pomierzono pionowy dynamiczny nacisk koła na szynie 60E1, z podkładami kolejowymi B70W, dla pojazdów przemieszczających się z prędkością $v_{max}=140$ km/h. Wynika z nich, że maksimum obciążeń pionowych szyny jest wynikiem przejazdu ciężkich lokomotyw oraz pociągów towarowych w stanie ładownym, natomiast odpowiednie minimum jest rezultatem przejazdu lekkich pociągów towarowych oraz osobowych. Z pomierzonych dynamicznych sił nacisku pionowego na tor wynikają naciski statyczne, które w przypadku lekkich pociągów osobowych i zespołów trakcyjnych wynoszą odpowiednio średnia wartość 11,3t, przy odchyleniu standardowym 2,8 t oraz dla ciężkich lokomotyw i wagonów towarowych 20,4 t i odchyleniu standardowym 1,4 t.

W opracowaniu [1] podano wskaźnik zużycia szyny (szyny zewnętrznej na łuku) jako stosunek obydwu zużyć tzn. a_s/a_h i tak:

- 1/0: brak zużycia bocznego szyn,
- 1/2: zużycie boczne i większe życie wysokościowe,
- 1/3: znaczące zużycie boczne i umiarkowane zużycie wysokościowe,
- 1/4: znaczące zużycie boczne i prawie znikome zużycie wysokościowe.

Propagacja zużycia szyn, jest zależna od promienia łuku toru w powiązaniu z naciskiem brutto i tak np.:

- $a_s/a_h=1/3$ dla promieni łuku toru $R \leq 300$ m,
- $a_s/a_h=1/2$ dla zakresu promieni łuków $300 \text{ m} < R < 1000$ m,
- $a_s/a_h=1/0$ dla łuków promieni łuku toru $R > 1000$ m.

Wskaźnik a_s/a_h opisuje stratę powierzchni przekroju szyny oraz zmniejsza wskaźnik wytrzymałości. Dlatego też często operuje się wskaźnikiem sumarycznym tzn. $k=a_s+a_h$, aby opisać powierzchnię zużycia. Zużycia dla poszczególnych szyn UIC 60E, 54E oraz 46E podano w tablicy 12.

4. WNIOSKI

1. Z przeprowadzonej analizy wynika, że układ koło-szlina jest bardzo skomplikowany pod względem technicznym, wymaga jeszcze wielu prac studialnych oraz badań eksperymentalnych, w celu zwiększenia niezawodności, dyspozycyjności i opłacalności taboru kolejowego i infrastruktury kolejowej z jednej strony, a z drugiej pozycji transportu kolejowego na rynku przewozu pasażerów oraz ładunków. W czasach, kiedy zarządzono oddzielenie infrastruktury kolejowej od użytkujących ją przewoźników konieczna jest więc współpraca obu sektorów. W przypadku kół

monoblock wheels and rails, respectively

2. Striving to obtain the longer and longer life of monoblock wheels and rails requires a complete change in the approach to the repair process. In the case of monoblock wheels, there is no sense "re-profiling" (reconstructing) of the outline of the outer rim of the wheel after exceeding all assessment parameters. Corrective repairs, which are allowed by the PN-EN 13715+A1:2011 standard [8] give a much better effect. This is due to the complex shape of the rim, which includes the running surface and the flange of the wheel. Therefore, it can be concluded that 1 mm of wear of the flange thickness corresponds to 2.5 mm of wear of the running surface of a monoblock wheel. In other words, the repair carried out with the reconstruction of the wheel profile, in which the correct wheel contour, suitable for safe riding was "recovered", but with large material losses (as a result of the machining of the contour contributes to the reduction of service life) cannot be called the economic repair. Preventive repairs and repairs, based on the expected service life based on the statistics of damage during operation, are gaining more and more importance.
3. As it result from the list of steel grades used for railway rails, there is now a wide range of choice. However, it should be remembered that the better the quality of the steel used for the railway rails, the higher the price of it is. However, as it result from the experiences of various carriers, the owner of the Viennese metro infrastructure decided to replace the railway rails with the R400 HT in order to increase maximally the service life of the track. Despite the presence of 11 steel grades for railway rails, the efforts to find even better grades of steel continue, especially by infrastructure owners [2]. It is not excluded that in the near future they will be included in the new edition of the PN-EN 13 674+A1:2017 [7].
4. In the case of railway rails, the preventive and predictive repairs are becoming increasingly important. They consist in removing the small scratches on the running surface and the side rail by grinding with a small range of the thickness of the removed layer, amounting about 0.1-0.3 mm. Grinding of rails is done with modern vehicles, manufactured by companies such as Plasser & Theurer or Robel.

monoblokowych pojazdów szynowych i szyn kolejowych decydującymi parametrami są wytrzymałość zmęczeniowa i zużycie. Zarówno przewoźnicy oraz właściciele infrastruktury dążą do jak największej żywotności odpowiednio kół monoblokowych oraz szyn.

2. Dążenie do coraz większych żywotności kół monoblokowych oraz szyn, wymaga całkowitej zmiany w podejściu do procesu napraw. W przypadku kół monoblokowych nie ma sensu „reprofilacja” (odtworzenie) zarysu zewnętrznego wieńca koła, po przekroczeniu wszystkich parametrów oceny. Znacznie lepszy efekt dają naprawy korekcyjne, które dopuszcza norma PN-EN 13715+A1:2011 [8]. Wynika to ze skomplikowanego kształtu wieńca, w skład którego wchodzi powierzchnia toczna oraz obrzeże koła. Można więc wyciągnąć wniosek, że 1 mm zużycia grubości obrzeża, odpowiada 2,5 mm zużycia powierzchni tocznej koła monoblokowego. Inaczej mówiąc, naprawa przeprowadzona z odtworzeniem profilu koła, w której „odzyskano” co prawda właściwy zarys koła, nadający się do bezpiecznej jazdy, ale z dużymi stratami materiałowymi (w wyniku obróbki mechanicznej zarysu) przyczynia się do zmniejszenia żywotności) nie można nazwać naprawą ekonomiczną. Coraz bardziej na znaczeniu zyskują naprawy prewencyjne oraz naprawy, prowadzone w oparciu o prognozowaną żywotność, opartą na statystyce uszkodzeń w czasie eksploatacji.
3. Jak wynika z zestawienia gatunków stali, stosowanych na szyny kolejowe, obecnie występuje duży zakres wyboru. Należy jednak pamiętać, że im bardziej lepsza gatunkowo stal, zastosowana na szyny kolejowe tym cena jej odpowiednio wzrasta. Jak wynika jednak z doświadczeń, różnych przewoźników, właściciel infrastruktury metra wiedeńskiego zdecydował o wymianie szyn kolejowych na R400 HT, aby zwiększyć maksymalnie żywotność toru. Pomimo występowania 11. gatunków stali na szyny kolejowe, nie ustają zabiegi w poszukiwaniu jeszcze lepszych gatunków stali, zwłaszcza przez właścicieli infrastruktury [2]. Nie jest wykluczone, że w niedalekiej przyszłości znajdą się one w nowej edycji normy PN-EN 13 674+A1:2017 [7].
4. W przypadku szyn kolejowych, wzrastają na znaczeniu naprawy prewencyjne oraz prognozowane. Polegają one na usuwaniu drobnych rys na powierzchni tocznej oraz bocznej szyny, drogą szlifowania, przy małym zakresie grubości zdjętej warstwy wynoszącej ok. 0,1÷0,3 mm. Szlifowanie szyn odbywa się za pomocą nowoczesnych pojazdów, wyprodukowanych przez takie firmy jak Plasser&Theurer lub Robel.

5. Bibliography / Bibliografia

- [1] *Nehrlich I., Steiner E.: Ortsdifferenzierte Standards zulässigen Schienenverschleißes, Teil 1. ZEVrail. März 2020*
- [2] *Schmitt S.: Walzstahl CogX. Verfügbarkeit bedeutet Langliebigkeit. ZeVrail Nr. 11/12*
- [3] *PN-EN13103:2018. Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Część 1: Zasady konstrukcji dla osi z czopami zewnętrznymi*
- [4] *PN-EN 13260+A1. Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Zestawy kołowe. Wymagania dotyczące wyrobu*
- [5] *PN-EN 13261+A2. Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie. Wymagania dotyczące wyrobu*
- [6] *PN-EN 13262+A2:2011. Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Koła. Wymagania dotyczące wyrobu*
- [7] *PN-EN 13674-1+A1:2017. Kolejnictwo. Tor. Szyna. Szyny kolejowe Vignole'a o masie 46 kg/m i większej*
- [8] *PN-EN 13715+A1:2011. Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Koła. Zarysy zewnętrzne wieńców kół*
- [9] *PN-EN 13749:2011. Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Metody określania wymagań konstrukcyjnych dla ram wózków*
- [10] *PN-EN 13979-1+A2:2011. Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Koła monoblokowe. Procedura dopuszczenia. Część 1: Koła kute i walcowane*
- [11] *PN-EN 14363+A1:2019. Kolejnictwo. Badania i symulacje modelowe właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu. Badania własności biegowych i próby stacjonarne*
- [12] *PN-EN 15273-1+A1:2017. Kolejnictwo. Skrajnie. Część 1: Postanowienia ogólne. Wymagania wspólne dla infrastruktury i pojazdów szynowych*
- [13] *PN-EN 15273-2+ . Kolejnictwo. Skrajnie. Część 2: Kolejnictwo. Skrajnia pojazdów szynowych*
- [14] *PN-EN 15273-3+A1:2017. Kolejnictwo. Skrajnie. Część 3: Kolejnictwo. Skrajnie budowli*
- [15] *Karta UIC 510-2. Pojazdy doczepne. Warunki do stosowania kół o różnych średnicach w układach biegowych różnego typu. 4. Wydanie październik 2002, kwiecień 2004*
- [16] *Karta UIC 510-5. Dopuszczalne techniczne kół monoblokowych- zastosowany dokument EN-13979-1. 2. Wydanie 05.2007*
- [17] *Karta UIC 832. Warunki techniczne dostawy wstawek klocków hamulcowych z żeliwa fosforowego dla pojazdów szynowych i wagonów. 4. wydanie, sierpień 2015*