

dr inż. Marek Sobaś, prof. IPS
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”

Wpływ naprężeń cieplnych od hamowania na trwałość kół monoblokowych wagonów towarowych

Influence of heat stress from braking on the stability of monoblock wheels of freight wagons

W artykule przedstawiono problem naprężeń cieplnych w kołach monoblokowych, przeznaczonych do wagonów towarowych. Koła monoblokowe posiadają wieniec ulepszony cieplnie. Wskutek takiego zabiegu obróbki cieplnej w wieńcu powstają naprężenia ściskające. W trakcie eksploatacji podczas procesu hamowania wstawkami hamulcowymi w kole wytwarzają się naprężenia rozciągające. Procesy hamowania mają coraz większy wpływ na trwałość kół monoblokowych w związku z wprowadzeniem do eksploatacji wstawek hamulcowych, wykonanych z materiałów kompozytowych.

The article presents the problem of thermal stress in monobloc wheels, designed for freight wagons. Monobloc wheels have a thermally improved rim. As a result of this heat treatment compressive stresses arise in the wheel rim. In operation during the braking process in the wheel brake blocks produce a tensile stress. Braking processes have an increasing impact on the sustainability of monobloc wheels in connection with putting brake blocks made from composite materials into operation.

1.WSTĘP

Koła monoblokowe dla wagonów towarowych są jednym z elementów obok osi, decydującym o bezpieczeństwie i niezawodności zestawu kołowego, a w konsekwencji pojazdu szynowego. Znaczenie osi oraz czynniki decydujące o ich trwałości zostały wymienione w następujących dokumentach:

- w normie europejskiej PN-EN 13103+A2:2012 [17], dotyczącej projektowania osi zestawów kołowych pojazdów tocznych

1.INTRODUCTION

Monobloc wheels for freight wagons are one of the elements next to the axis, determining the safety and reliability of the wheel set and as a result of the vehicle. The meaning of axes and factors determining their stability are listed in the following documents:

- in the European standard PN-EN 13103+A2:2012 [17] concerning the design axle wheelset of rolling vehicles
- in the European standard PN-EN 13260+A1:2011 [18], concerning the assembly of wheel sets

- w normie europejskiej PN-EN 13260+A1:2011 [18], dotyczącej montażu zestawów kołowych
- w normie europejskiej PN-EN 13261+A1:2011 [19], dotyczącej wymagań dotyczących osi zestawów kołowych
- w normie europejskiej PN-EN 15313:2010 [23], dotyczącej utrzymania zestawów kołowych pojazdów w eksploatacji i wyłączonych z eksploatacji,
- w karcie UIC 813 [15], dotyczącej tolerancji i montażu zestawów kołowych
- w opracowaniach [5÷11].

W przypadku kół monoblokowych dla wagonów towarowych kryteria bezpieczeństwa są przedstawione w następujących przepisach europejskich:

- w normie europejskiej PN-EN 13979-1+A2:2011 [22] dla procedury dopuszczenia kół monoblokowych,
- w normie europejskiej PN-EN 13715+A1:2011 [21] dla zewnętrznych zarysów wieńców kół,
- w normie europejskiej PN-EN 13262+A1:2011 [20] dla wymagań, dotyczących gotowych zestawów kołowych,
- w normie europejskiej PN-EN 15313:2010 [23], dotyczącej utrzymania zestawów kołowych pojazdów w eksploatacji i wyłączonych z eksploatacji,
- w karcie UIC 510-2 [13], dotyczącej kół dla pojazdów doczepnych,
- w karcie UIC 510-5 [18], dotyczącej dopuszczenia kół monoblokowych,
- w karcie UIC 813 [15], dotyczącej tolerancji i montażu zestawów kołowych
- w opracowaniach [1÷4].

Ważnym elementem w ocenie kół w ostatnim czasie dodatkowo masa własna oraz maksymalne dopuszczalne zużycie wieńca. Obydwa kryteria są ograniczone wytrzymałością

koła, wynikającą z działania sił, przedstawionych w normie europejskiej PN-EN 13979-1+A2:2011 [22] oraz zachowaniem przez części usprężynowane i nieusprężynowane zarysu odniesienia, określonego przez kartę UIC 505-1 [12].

- in the European standard PN-EN 13261+A1:2011 [19], concerning the requirements for the axis of wheel sets
- in the European standard PN-EN 15313:2010 [23], concerning the maintenance of wheel sets on vehicles in use and out of operation,
- in UIC 813 [15], regarding tolerance and assembly of wheel sets
- in studies [5÷11].

In the case of monobloc wheels for wagons the safety criteria are presented in the following European legislation:

- in the European standard PN-EN 13979-1+A2:2011 [22] concerning the approval procedure of monobloc wheels,
- in the European standard PN-EN 13715+A1:2011 [21] concerning the outer contours of the wheel rims,
- in the European standard PN-EN 13262+A1:2011 [20] concerning the requirements of the finished wheel sets,
- in the European standard PN-EN 15313:2010 [23], concerning the maintenance of wheel sets on vehicles in use and out of operation,
- in UIC 510-2 [13], on the wheels of trailer vehicles,
- in UIC 510-5 [18], concerning the approval of monobloc wheels,
- in UIC 813 [15], regarding tolerance and assembly of wheel sets
- in studies [1÷4].

An important element in the assessment of the wheels recently became their weight, and the maximum allowable wear of the rim. Both criteria are by the limited strength wheels, resulting from the action of forces outlined in the European standard PN-EN 13979-1+A2:2011 [22] and the behavior of the parts with and without springs of reference profile, specified by UIC 505-1 [12].

2. MATERIAL USED FOR MONOBLOCK WHEELS AND ITS CHARACTERISTICS

Materials that should be used for monobloc wheels are listed in PN-EN 13262:2012 [20]. The chemical composition of the materials is shown in Table 1.

Skład chemiczny stali ER6, ER7, ER8 i ER9 używanych na koła monoblokowe Tabela 1

The chemical composition of ER6, ER7, ER8 and ER9 steel used in monobloc wheels Table 1

Gatunek stali	Maksymalny udział procentowy pierwiastków ^{a)}										
	C [0,48]	Si [0,40]	Mn [%]	P ^{b)} [%]	S ^{b)} [%]	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	0,60	0,40	0,80	0,20	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50

- a) dla poszczególnych zastosowań można ustalić odstępstwa od maksymalnych wartości
 b) maksymalną zawartość fosforu 0,025% można podać w ofercie lub zamówieniu
 c) minimalną zawartość siarki można podać w ofercie lub w zamówieniu, zgodnie z procesem wytwarzania stali, aby zabezpieczyć stal przed pękaniem wodorowym.

- a) derogation from the maximum values can be determined for a particular application
 b) the maximum phosphorus content of 0.025% can be specified in the offer or contract
 c) the minimum sulfur content can be specified in the offer or in the order, according to the manufacturing process of steel to protect the steel from hydrogen cracking.

Właściwości wytrzymałościowe wieńca i tarczy koła w zależności od gatunku stali są podane w tabeli 2.

Tensile properties of the rim and a wheel disc according to the type of steel are shown in Table 2.

Własności wytrzymałościowe wieńca i tarczy kół wykonanych ze stali ER6,ER7,ER8 i ER9 Tabela 2
The resistance properties of the wheel rim and disc made of ER6, ER7, ER8 and ER9 grade steel Table 2

Gatunek stali	Wieńiec			Tarcza koła	
	R _{eH} [MPa]	R _m [MPa] ^a	A ₅ [%]	Zmniejszenie R _m [N/mm ²]	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. Jeżeli nie występuje wyraźna granica plastyczności, należy wyznaczyć umowną granicę plastyczności R_{p0,2}
 b. zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie w porównaniu z granicą wytrzymałości na rozciąganie na tym samym kole.

- a. If no distinctive yield strength appears, the assumed yield strength R_{p0,2} must be determined
 b. decrease in tensile strength compared to the tensile strength limit of the same wheel.

Wartości udarności dla poszczególnych gatunków stali są podane w tabeli 3.

Toughness values for individual steel grades are given in Table 3.

Wartości prób udarności, wykonanych na próbkach ze stali ER6,ER7,ER8 i ER9 Tabela3
The values of impact tests, performed on samples of steel ER6, ER7, ER8 and ER9 Table 3

Gatunek stali	KU (w dżulach) w temperaturze +20°		KV (w dżulach) w temperaturze -20°C	
	Wartości średnie	Wartości minimalne	Wartości średnie	Wartości minimalne
ER6	≥17	≥12	≥12	≥8
ER7	≥17	≥12	≥10	≥7
ER8	≥17	≥12	≥10	≥5
ER9	≥13	≥9	≥8	≥5

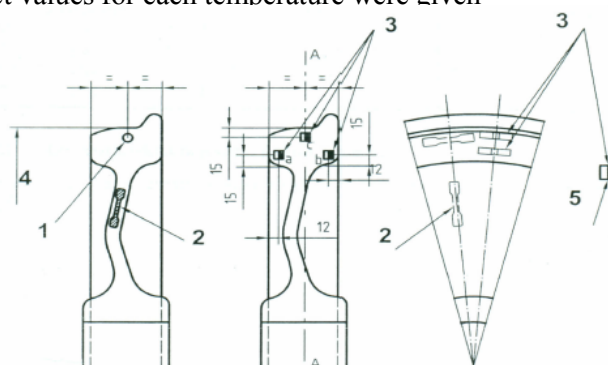
Uwaga: podano średnie i minimalne wartości udarności dla każdej temperatury
 Note: the average and minimum impact values for each temperature were given

Dla całej strefy zużycia wieńca koła, twardość wg Brinella powinna być większa lub równa wartościom podanym w tabeli 5.

Podane wartości należy utrzymać do głębokości 35 mm pod powierzchnią toczną koła a także wtedy, gdy głębokość zużycia jest większa niż 30 mm.

W strefie przejściowej między wieńcem i tarczą koła (punkt A na rys.2) twardość powinna być mniejsza o 10 stopni Brinella od wartości na granicy zużycia.

Kategoria koła jest zdefiniowana w p.1 normy europejskiej PN-EN 13262+A2:2011 [20] zgodnie z którym koła kategorii 1 są przeznaczone dla pojazdów poruszających się z prędkością powyżej 200 km/h, natomiast kategoria 2 jest przeznaczona dla pojazdów poruszających się z prędkością poniżej 200 km/h.



Objaśnienia do rys.1:

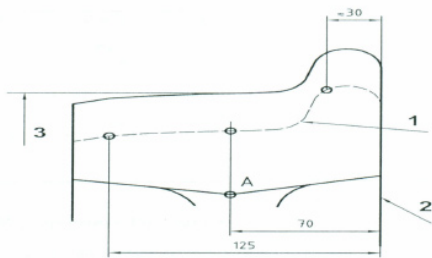
- 1-Próbka do badań na rozciąganie
- 2-Próbka do badań na rozciąganie
- 3-Próbka do badań udarności
- 4-Średnica nominalna
- 5-Karb

Explanations for Figure 1:

- 1-Tensile test sample
- 2-Tensile test sample
- 3-Impact test sample
- 4-Nominal diameter
- 5-Notch

Rys.1. Miejsce pobierania próbek do badań wytrzymałościowych na rozciąganie i udarności

Fig.1. Sampling places for testing tensile strength and impact resistance



- 1-Granica zużycia lub średnica po ostatnim przetoczeniu (zgodnie z wymaganiami zamawiającego)
 2. Wewnętrzna powierzchnia obrabianego koła
 3. Średnica nominalna
 A- punkt w strefie przejściowej pomiędzy wieńcem i tarczą koła

1. Wear limit diameter or the diameter after the last movement (according to customer requirements)
 2. The inner surface of the processed wheels
 3. Nominal diameter
 A - point in the transition zone between the rim and the wheel disc

Rys.2. Lokalizacja odcisków w celu badania twardości wieńca koła monoblokowego (łącznie 4 punkty pomiaru twardości)

Fig.2. Location of points in order to study the hardness of the monobloc wheel rim (including 4 points of measurement of hardness)

Koła przeznaczone do dostawy dla klienta powinny posiadać obrabione powierzchnie. Chropowatość kół w stanie dostawy powinna być zgodna z tabelą 6.

Chropowatość powierzchni R_a kół monoblokowych w stanie dostawy Tabela 6
 The surface roughness R_a of monobloc wheels as delivered Table 6

Strefa koła	Stan dostawy	Chropowatość powierzchni R_a (μm)	
		Kategoria 1	Kategoria 2
Otwór	Obrobiony	≤ 12	
	Otwór	0,8 do 3,2	
Tarcza i piasta	obrobiony	$\leq 3,2$	$\leq 12,5$
Powierzchnia toczna	obrobiony	$\leq 6,3$	$\leq 12,5$
Powierzchnia boczna wieńca koła	obrobiony	$\leq 6,3$	$\leq 12,5$

Tacza koła, niezależnie od gatunku stali, powinna wytrzymać zmianę naprężeń $\Delta\sigma$ podaną w tabeli 7.

Dopuszczalne wartości dotyczące właściwości zmęczeniowych Tabela 7

Acceptable values for the fatigue properties Table 7

Stan dostawy tarczy koła	$\Delta\sigma$ [MPa]
obrobiony	450
walcowany	315

For the whole usable area of the wheel rim, Brinell hardness should be greater than or equal to the values given in Table 5.

These values should be maintained to a depth of 35 mm under the wheel tread and if the wear-depth is greater than 30 mm.

In the transition zone between the rim and the wheel center (point A in Figure 2), the hardness should be 10 Brinell degrees less than the value on the wear edge.

Wheel category is defined in p.1 of the European standard PN-EN 13262+A2:2011 [20] according to which the wheels of category 1 are intended for vehicles traveling at speeds above 200 km/h, while Category 2 wheel are for vehicles traveling with a maximum speed of up to 200 km/h.

Wartości twardości Brinella na wieńcu koła monoblokowego w zależności od kategorii Tabela 5

Brinell hardness values of the monobloc wheel rim depending on the category Table 5

	Kategoria 1	Kategoria 2
ER6	-	225
ER7	245	235
ER8	245	245
ER9	-	255

Wheels intended for delivery to the customer should have finished surfaces. The roughness of the wheels in the state of delivery should be in accordance with Table 6.

Wheel disc, regardless of the grade of steel must withstand the stress changes $\Delta\sigma$ given in Table 7.

These criteria, set out in PN-EN 13262+A2:2011 [20] apply to the fatigue tests carried out on wheels according to Annex B of this standard.

When performing strength calculations for monobloc wheels with finite elements method expensive testing can be avoided when the amplitude $\Delta\sigma = \sigma_{\text{MAX}} - \sigma_{\text{MIN}}$ at all points of the wheel disc meets the following values:

- for wheels with a disc processed with machines:

$$A = 360 \text{ N/mm}^2$$

- for wheels with unprocessed disc: $A = 290 \text{ N/mm}^2$.

Kryteria te, przedstawione w PN-EN 13262+A2:2011 [20] obowiązują dla badań zmęczeniowych, przeprowadzonych na kołach wg załącznika B niniejszej normy.

W przypadku wykonywania obliczeń wytrzymałościowych kół monoblokowych metodą elementów skończonych można zrezygnować z kosztownych badań, jeśli amplituda $\Delta\sigma = \sigma_{MAX} - \sigma_{MIN}$ we wszystkich punktach tarczy koła spełnia następujące wartości:

- dla kół z tarczą obrobioną mechanicznie: $A = 360 \text{ N/mm}^2$

- dla kół z nieobrobioną tarczą: $A = 290 \text{ N/mm}^2$.

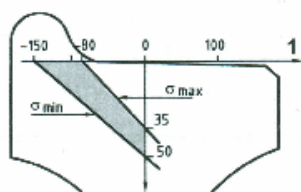
Analiza naprężeń należy wykonać w następujący sposób:

- wyznaczyć naprężenia główne we wszystkich punktach siatki (węzły) dla każdego z trzech przypadków obciążeń
- ocenę dla każdego węzła, maksimum naprężenia głównego dla trzech przypadków obciążeń σ_{MAX} i kierunku tego naprężenia głównego.
- ocenę dla każdego węzła, minimum naprężenia, równego najniższemu naprężeniu w kierunku σ_{MAX} , dla trzech przypadków obciążeń σ_{MIN} .
- obliczenie dla każdego węzła.

Przypadki obciążeń są przedstawione na rys.3.

W celu zwiększenia odporności powierzchni tocznej oraz obrzeża dokonuje się zabiegu ulepszenia wieńca kół. Ulepszenie cieplne polega na hartowaniu oraz odpuszczaniu w wysokich temperaturach tzn. 850° powyżej temperatury austenitowania, tzn. podgrzane koło jest chłodzone w sposób przyspieszony na powierzchni tocznej. W ten sposób wieńiec koła kurczy się w stosunku do tarczy koła, co prowadzi do trwałych odkształceń. Po wyrównaniu temperatury i wzrostem granicy plastyczności powstają mała plastyczne odkształcenia. W wyniku tego zabiegu powstaje struktura naprężeń ściskających, których przebieg jest opisany w punkcie 3.5.2, gdzie znajduje się zapis następujący: „Poziom naprężeń ściskających w kierunku obwodowym, mierzonych w pobliżu powierzchni tocznej, powinien znajdować się w przedziale wartości od 80 MPa (80 N/mm^2) do 150 N/mm^2 . Naprężenia powinny wynosić zero na głębokości od 35 mm do 50 mm poniżej powierzchni tocznej.”

Rozkład naprężeń jest przedstawiony na rys.4.



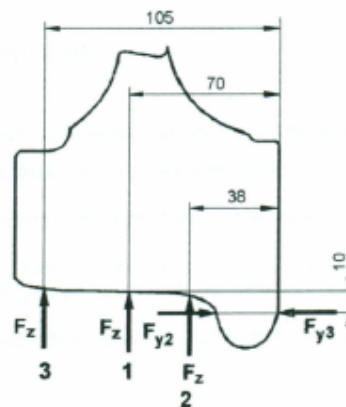
Objaśnienia

1 Naprężenia obwodowe, w N/mm^2

Stress analysis should be performed as follows:

- determine the principal stresses on all grid points (nodes) for each of the three load cases
- evaluation for each node, the maximum principal stress σ_{MAX} for the three load cases and direction of the principal stress.
- evaluation for each node, the minimum stress, equal to the lowest direction tension σ_{MAX} , for the three load cases σ_{MIN} .
- calculation for each node.

The load cases are shown in Figure 3.



1 Tor prosty

2 Łuk toru

3. Przejazd przez zwrotnice

1 Straight track

2 Curved track

3. Drive through crossovers

Rys.3. Punkty przyłożenia sił do koła w różnych stanach eksploatacyjnych wg p.7.2.1 normy PN-EN 13979-1+A2:2011 [22].

Fig.3. Points of force application to the wheels in different operating states in accordance with p.7.2.1 of the standard PN-EN 13979-1+A2:2011 [22].

For improving the running surface of the wheel and the rim the treatment of wheel rims is performed. Thermal improvement uses quenching and tempering, and uses tempering at high temperatures, i.e. 850°C above austenitizing temperature, meaning that the heated wheel is cooled in an accelerated manner on the rolling surface. In this way the wheel rim shrinks relative to the wheel disc, which leads to permanent deformations. After the temperature is equalized and the yield strength increase small plastic deformations form. As a result of this treatment a structure of compressive stress arises, which process is described in section 3.5.2, where there is a provision as follows: „The level of compressive stress in the circumferential direction, measured near the surface of the tread should be in a range from 80 MPa (80 N/mm^2) to 150 N/mm^2 . Stress should be zero at a depth of 35 mm to 50 mm below the running surface.”

Stress distribution is shown in figure 4.

Rys.4. Rozkład naprężeń ściskających w wieńcu koła monoblokowego wg p.3.5.2 PN-EN 13262 [20]

Fig.4. Distribution of compressive stresses in the rim of the wheel monobloc in accordance with p.3.5.2 PN-EN 13262 [20]

Jak widać z rys.4 rozkład naprężeń ściskających znajduje się w obszarze między dwoma prostymi:

1. pierwsza prosta określa minimalne naprężenia ściskające, wynoszące -150 N/mm^2 , które zwiększają się liniowo w miarę głębokości i osiągają wartość zerową w odległości 50 mm od powierzchni tocznej
2. druga prosta określa maksymalne naprężenia ściskające, wynoszące -80 N/mm^2 , które zwiększają się liniowo w miarę głębokości i osiągają wartość zerową w odległości 35 mm od powierzchni tocznej.

Tak więc punkty zmiany znaku naprężeń ze ściskających na rozciągające mogą znajdować się w odległości 35 mm÷50 mm od powierzchni tocznej.

Tak więc obróbka cieplna ma istotne znaczenie, wydłużające w znaczący sposób trwałość koła. Istotą obróbki cieplnej, a w następstwie naprężenia ściskające zgodnie z rys.4 jest ochrona powierzchni zewnętrznej przed powstawaniem rys, które są zaczątkiem pęknięć zmęczeniowych, mogących tworzyć zagrożenie eksploatacyjne. Czynnikiem sprzyjającym powstawaniu rys zmęczeniowych na powierzchni wieńca koła są naprężenia cieplne, które powstają podczas hamowania, wytwarzające naprężenia rozciągające. Wskutek procesów hamowania naprężenia ściskające ulegają stopniowej zmianie. Oddziaływanie naprężeń cieplnych na koło zwiększyło się wskutek zastosowania wstawek z tworzyw sztucznych typu K oraz wstawek typu LL, zamiast wstawek z żeliwa fosforowego P10 wg karty UIC 832 [16]. Wstawki z tworzywa sztucznego zostały wprowadzone jako środek do zmniejszenia emisji hałasu przez pojazd szynowy do środowiska naturalnego. W takim przypadku ciepło, wywiązujące się podczas hamowania przepływa zasadniczo przez powierzchnię wieńca koła, gdyż materiały kompozytowe mają znaczenie gorszą przewodność cieplną niż żeliwo fosforowe. Proces hamowania prowadzi do procesu odwrotnego niż w trakcie wytwarzania i zmiany kierunku naprężeń ściskających. Temperatury, które powstają podczas procesu hamowania i ich gradienty w przekroju koła – „gorący wieńiec”, „zimna tarcza” mogą spowodować spadek granicy plastyczności oraz znaczące naprężenia w kole, co jest przedstawione na rys.5. Jak wykazują doświadczenia oraz praktyka eksploatacyjna już po pierwszym hamowaniu ciągłym z dużą mocą naprężenia ściskające, wytwarzane na etapie produkcyjnym nie występują, natomiast na obwodzie wieńca wytwarzają się naprężenia rozciągające. Im większa więc wartość naprężeń rozciągających po kolejnych hamowaniach ciągłych, tym większe są wartości naprężeń rozciągających, a tym samym rośnie ryzyko powstawania pęknięć zmęczeniowych.

3. KRYTERIA CIEPLNYCH BADAŃ STANOWISKOWYCH

According to figure 4 the distribution of compressive stress is in the area between the two lines is:

1. The first straight specifies the minimum compressive stresses ranging from -150 N/mm^2 , which increases linearly with the depth and reaches a zero value at a distance of 50 mm from the running surface
2. The second straight line defines the maximum compressive stress ranging from -80 N/mm^2 , which increases linearly with the depth and reaches a zero value at a distance of 35 mm from the running surface.

Thus, the points of change of sign of the compressive stress in the stretching may be at a distance of 35 mm÷50 mm from the running surface.

Thus, the heat treatment is of major importance in considerably extending the durability of the wheel. The essence of heat treatment, and the resulting compressive stress according to fig 4, is to protect the outer surface against the formation of scratches, which are the beginning of fatigue cracks, that may pose a threat in further exploitation. Factors contributing to the appearance of fatigue cracks on the surface of the wheel rim are thermal stresses that arise during braking, producing tensile stress. As a result of the braking process compressive stresses are gradually changing. The impact of thermal stress on the wheel increased by the use of composite inserts of K and LL-blocks instead of P10 phosphorous cast iron inserts according to UIC 832 [16]. Inserts made of composites were introduced as a means to reduce noise emissions in the rail vehicle environment. In this case the heat produced during braking flows mostly through the surface of the wheel rim, since the composite materials have poorer thermal conductivity than phosphorus cast iron. Braking leads to a reverse process than during the production and change the direction of compressive stress. Temperatures that arise during the braking process and their gradients in a circular cross-section - the "hot crown", "cold shield" may cause a decrease in yield strength and significantly stress in the wheel, which is illustrated in Figure 5. As the experience and operational practice shows, already after the first continuous braking, the effect of the large compressive stress provided at the production stage are nonexistent, while at the periphery of the rim tensile stresses are produced. The higher the value of tensile stress during continuous braking, the higher the tensile stress, thereby increasing the risk of fatigue cracks.

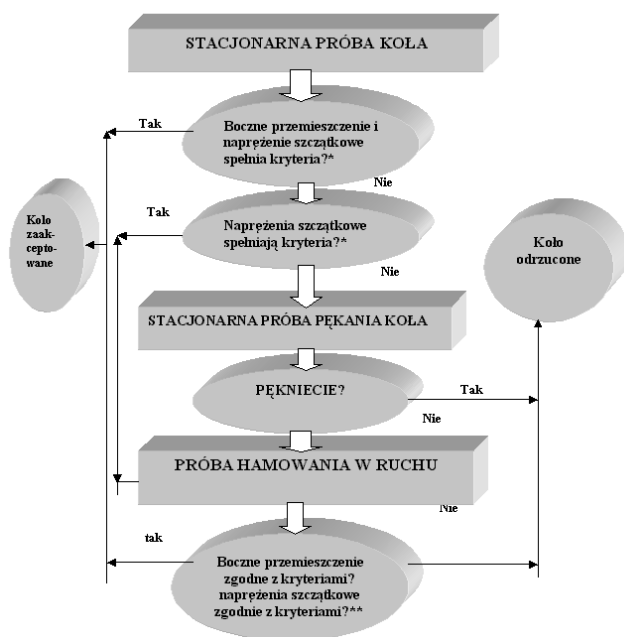
3. CRITERIA FOR THERMAL TEST STAND RESEARCH

Thermomechanical research of wheel rims are part of the approval tests for monobloc wheels and take place according to the monobloc scheme shown in Fig.6. Stationary braking test consists of 10 braking attempts on the wheel and measuring the effects by the method of observation and recording of:

Badania termomechaniczne wieńców kół są częścią badań homologacyjnych kół monoblokowych i odbywają się wg schematu monoblokowego przedstawionego na rys.6.

Stacjonarna próba hamowania składa się z 10-ciu hamowań na kole oraz mierzenia ich efektów metodą obserwacji i rejestracji:

- naprężeń szczątkowych w wieńcu koła
- maksymalnego przemieszczenia wieńca koła podczas hamowania
- przemieszczenia (odkształcenia trwałego) wieńca koła po hamowaniu.



Rys.6. Schemat blokowy prób homologacyjnych kół monoblokowych wg normy europejskiej PN-EN 13979-1+A2:2011 [22]

Fig.6. The block diagram attempts approval monobloc wheels according to European standard PN-EN 13979-1+A2:2011 [22]

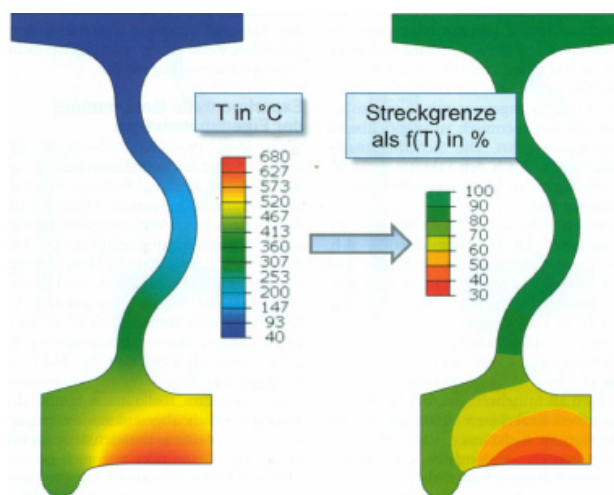
Kryteria oceny dla stacjonarnej próby hamowania (oznaczenie gwiazdką na harmonogramie) powinny być zostać spełnione równocześnie dla koła z nowym wieńcem i dla koła z wieńcem zużyтым.

Koło z nowym wieńcem po stacjonarnej próbie hamowania muszą spełniać następujące kryteria:

- maksymalne boczne przemieszczenie wieńca podczas hamowania wynosi +3/-1 mm
- poziom naprężeń szczątkowych w wieńcu po chłodzeniu: $\sigma_m \leq \Sigma_i N/mm^2$ jako średnia z trzech pomiarów oraz $\sigma_{in} = +(\Sigma + 50) N/mm^2$
- maksymalne boczne przemieszczenie boczne wieńca po chłodzeniu: +1,5/-0,5 mm.

Koło z wieńcem zużyтым po stacjonarnej próbie hamowania muszą spełniać następujące kryteria:

- maksymalne boczne przemieszczenie wieńca podczas hamowania wynosi +3/-1 mm



Rys.5. Spadek granicy plastyczności po zakończeniu badań stanowiskowych klockiem, przy mocy hamowania 45 kW i czasie hamowania 45 min wg [4]

Fig.5. The decrease in yield strength after the test bench block, the braking power of 45 kW and braking time of 45 min [4]

- residual stresses in the rim of the wheel
- the maximum displacement of the wheel rim during braking
- displacement (permanent deformation) of the wheel rim after braking.

The evaluation criteria for the **stationary brake tests (marked with an asterisk on the schedule)** should be satisfied simultaneously for the new wheel rim and a wheel with a worn rim.

Wheel with a new rim must meet the following criteria on the braking test:

- maximum lateral displacement of the rim during braking is +3/-1 mm
- level of residual stresses in the rim after cooling: $\sigma_m \leq \Sigma_i N/mm^2$ as an average of three measurements and $\sigma_{in} = +(\Sigma + 50) N/mm^2$
- maximum lateral displacement of the rim after cooling: +1,5/-0,5 mm.

Wheel with a worn rim must meet the following criteria in the braking test:

- maximum lateral displacement of the rim during braking is +3/-1 mm
- level of residual stresses in the rim after cooling: $\sigma_m \leq \Sigma_i + 75 N/mm^2$ as an average of three measurements and $\sigma_{in} = +(\Sigma + 100) N/mm^2$ for each measurement
- maximum lateral displacement of the rim after cooling: +1,5/-0,5 mm.

The value of Σ_r is defined depending on the type of steel used for the production of the wheel. For steels ER6 and ER7 $\Sigma_r = 200 N/mm^2$. **These requirements are consistent with p.6.2.2 PN-EN 13979-1+A2:2011 [22].**

The evaluation criteria for the **test braking test (marked with two asterisks on the schedule)** should be

- poziom naprężeń szczytkowych w wieńcu po chłodzeniu: $\sigma_{rw} \leq +\Sigma_i + 75 \text{ N/mm}^2$ jako średnia z trzech pomiarów oraz $\sigma_{in} = +(\Sigma + 100) \text{ N/mm}^2$ dla każdego pomiaru
- maksymalne boczne przemieszczenie wieńca po chłodzeniu: $+1,5/-0,5 \text{ mm}$.

Wartość Σ_r jest zdefiniowana w zależności od gatunku stali, użytego do produkcji koła. Dla gatunków stali ER6 i ER7 wartość $\Sigma_r = 200 \text{ N/mm}^2$. **Wymagania te są zgodne z p.6.2.2 PN-EN 13979-1+A2:2011 [22].**

Kryteria oceny dla próby hamowania w ruchu (oznaczenie dwoma gwiazdkami na harmonogramie) powinny być zostać spełnione równocześnie dla koła z nowym wieńcem i dla koła z wieńcem zużyтым.

Koło z nowym wieńcem po stacjonarnej próbie hamowania muszą spełniać następujące kryteria:

- maksymalne boczne przemieszczenie wieńca podczas hamowania wynosi $+3/-1 \text{ mm}$
- poziom naprężeń szczytkowych w wieńcu po chłodzeniu: $\sigma_{rw} \leq +\Sigma_i \text{ N/mm}^2$ jako średnia z trzech pomiarów oraz $\sigma_{in} = +(\Sigma - 50) \text{ N/mm}^2$
- maksymalne boczne przemieszczenie boczne wieńca po chłodzeniu: $+1,5/-0,5 \text{ mm}$.

Koło z wieńcem zużyтым po stacjonarnej próbie hamowania muszą spełniać następujące kryteria:

- maksymalne boczne przemieszczenie wieńca podczas hamowania wynosi $+3/-1 \text{ mm}$
- poziom naprężeń szczytkowych w wieńcu po chłodzeniu: $\sigma_{rw} \leq +\Sigma_i \text{ N/mm}^2$ jako średnia z trzech pomiarów oraz $\sigma_{in} = +(\Sigma + 50) \text{ N/mm}^2$ dla każdego pomiaru
- maksymalne boczne przemieszczenie wieńca po chłodzeniu: $+1,5/-0,5 \text{ mm}$.

Wartość Σ_r jest zdefiniowana w zależności od gatunku stali, użytego do produkcji koła. Dla gatunków stali ER6 i ER7 wartość $\Sigma_r = 200 \text{ N/mm}^2$. **Wymagania te są zgodne z p.6.4.3 PN-EN 13979-1+A2:2011 [22].**

4. ANALIZA PEKNIĘĆ KÓŁ MONOBLOKOWYCH

Pełnięcia kół monoblokowych są spowodowane przeniesieniem:

- błędów na etapie wytwarzania kół monoblokowych w stanie nieobrobionym mechanicznie (np. przewalcowanie na obwodzie powierzchni tocznej)
- niewłaściwych wartości oraz rozkładu naprężeń ściskających w wieńcu koła monoblokowego (niewłaściwa obróbka cieplna)
- błędów na etapie obróbki mechanicznej, w wyniku której powstają ślady po obróbkowej mające charakter rys w skali makro
- niewłaściwym przechowywaniu u producenta,
- podczas transportu, wskutek niewłaściwego załadunku i rozładunku

satisfied simultaneously for the new wheel rim and a wheel with a worn rim.

Wheels with a new rim on the stationary braking test must meet the following criteria:

- maximum lateral displacement of the rim during braking is $+3/-1 \text{ mm}$
- level of residual stresses in the rim after cooling: $\sigma_{rw} \leq +\Sigma_i \text{ N/mm}^2$ as an average of three measurements and $\sigma_{in} = +(\Sigma - 50) \text{ N/mm}^2$
- maximum lateral displacement of the rim after cooling: $+1,5/-0,5 \text{ mm}$.

Wheels with a worn rim on the stationary braking test must meet the following criteria:

- maximum lateral displacement of the rim during braking is $+3/-1 \text{ mm}$
- level of residual stresses in the rim after cooling: $\sigma_{rw} \leq +\Sigma_i \text{ N/mm}^2$ as an average of three measurements and $\sigma_{in} = +(\Sigma + 50) \text{ N/mm}^2$ for each measurement
- maximum lateral displacement of the rim after cooling: $+1,5/-0,5 \text{ mm}$.

The value Σ_r is defined depending on the type of steel used for the production of the wheel. For steels ER6 and ER7 $\Sigma_r = 200 \text{ N/mm}^2$. **These requirements are consistent with p.6.4.3 PN-EN 13979-1+A2:2011 [22].**

4. ANALYSIS OF MONOBLOCK WHEEL FRACTURES

Cracks monobloc wheels are caused by:

- errors at the stage of manufacturing monobloc wheels not processed mechanically (e.g. over-rolling of the tread periphery)
- wrong values and the distribution of compressive stresses in the rim of the wheel monobloc (improper heat treatment)
- errors at the stage of machining, which results in traces of machining having the character of cracks in the macro scale
- improper storage by manufacturer,
- during transportation, due to improper loading and unloading
- vertical forces acting in the wheel-rail system
- lateral forces acting on wheel-rail system
- braking forces caused by the brake pad insert for prolonged emergency braking
- by the action of the track brake jaws on the side surfaces of the wheel rims, located at the foot of the humps.

As a result of the braking surface overheating of the surface of the wheel rim may arise on the tread.

If scratches are present on the rolling surface, then these can be semi-elliptical in shape. Fatigue cracks, which are formed on the edges of the wheel flanges are shaped closer to a quarter ellipse. Along with the enlargement of fatigue cracks these cracks can retain their original shape. Along with the enlargement of the fatigue cracks they can also lose their original shape

- sił pionowych działających w układzie koło-szyrna
- sił poprzecznych działających w układzie koło-szyrna
- sił hamowania, spowodowanym wstawką klocka hamulcowego przy długotrwałym hamowaniu nagłym
- skutek działania szczęk hamulców torowych na powierzchnie boczne wieńców kół, umieszczonych u podnóża górek rozrządowych.

W wyniku hamowania na powierzchni tocznej koła mogą powstać przegrzania powierzchni wieńca koła.

Jeśli rysy występują na powierzchni tocznej, to wówczas mają one z reguły kształt półeliptyczny. Rysy zmęczeniowe, które powstają na krawędziach obrzeży kół mają kształt zbliżający się do ćwiartki elipsy. Wraz z powiększaniem się rys zmęczeniowych rysy mogą zachować swój pierwotny kształt. Wraz z powiększaniem się rys zmęczeniowych rysy mogą tracić swój pierwotny kształt i przyjmować bardzo różne inne formy.

W związku z występowaniem rys zmęczeniowych na powierzchni kół monoblokowych powstają problemy, które można sprowadzić do:

- wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji kół z rysami
- stabilnego wzrostu rysy zmęczeniowej, w wyniku działania cyklicznych obciążeń w kierunku pionowym i poprzecznym
- wywołania niestabilnego rozwoju rysy, tzn. przełomu kończącego trwałość koła.

5. WSPÓŁCZYNNIK INTENSYWNOŚCI NAPRĘŻEŃ

W zakresie liniowo-sprężystym odkształceń materiałowych stosuje się pojęcie współczynnika intensywności naprężeń K_f , który charakteryzuje koncentrację naprężeń w pobliżu rysy zmęczeniowej. Związek pomiędzy naprężeniami w pobliżu wierzchołka rysy oraz współczynnikiem intensywności (koncentracji) naprężeń można przedstawić za pomocą zależności:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{\pi \cdot r}} \cdot f(\vartheta) \quad (1)$$

gdzie:

r i ϑ są współrzędnymi biegunowymi

Współczynniki koncentracji naprężeń przedstawia się zwykle za pomocą wzoru:

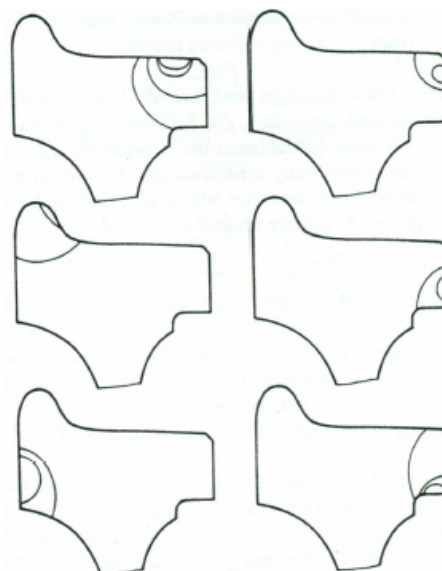
$$\sigma = \sigma_{MOM} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f \quad (2)$$

gdzie:

σ_{NOM} - naprężenie odnoszące się do powstałej rysy,

a - półoś elipsy

f – współczynnik korekcyjny (niem. „Korrekturfaktor”)



Rys.7. Charakterystyczne punkty wyjściowe i kształty krytycznych rys zmęczeniowych na wieńcu kół monoblokowych, hamowanych na powierzchni tocznej przez wstawki klocków hamulcowych

Fig.7. The characteristic starting points and shapes critical feature of fatigue on the rim of monobloc wheels, braked on the rolling surface by inserts of brake pads

and adopt a variety of other forms.

Due to the existence of fatigue cracks on the surface of monobloc wheels problems have appeared that can be summarized as:

- the durability of wheels with fatigue cracks
- stable growth of fatigue cracks, as a result of cyclic loads in the vertical and transverse directions
- causing an unstable growth of the crack thus ending the life of the wheel.

5. STRESS INTENSITY FACTOR

In the field of linear-elastic deformation of the material the concept of the stress intensity factor K_f is used, which is characterized by stress concentration near the fatigue cracks. The relationship between stress near the top of cracks and the rate of intensity (concentration) of the stress can be represented by:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{\pi \cdot r}} \cdot f(\vartheta) \quad (1)$$

where:

r and ϑ are polar coordinates

Stress concentration factors are commonly represented by the formula:

$$\sigma = \sigma_{MOM} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f \quad (2)$$

where:

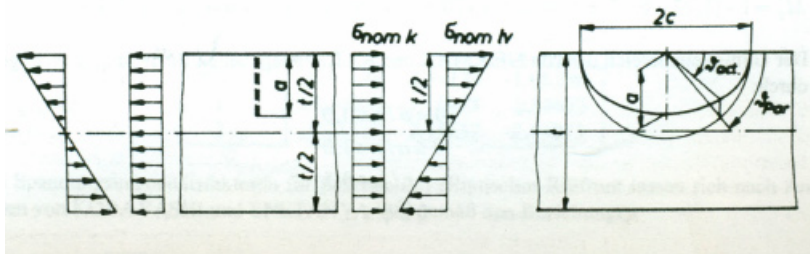
σ_{NOM} - stress related to the crack,

a - semi-major axis of the ellipse

f – correction factor (Ger. „Korrekturfaktor”)

Współczynnik ten uwzględnia pozostałe czynniki, mające wpływ na rozwój rysy zmęczeniowej. Wzór ten odnosi się do półeliptycznej rysy na powierzchni znajdującej się na powierzchni, podlegającej rozciąganiu i zginaniu (rys.8).

This factor takes into account other factors affecting the development of fatigue cracks. This formula applies to semi-elliptical cracks on the surface which is subject to tension and bending (Figure 8).



Rys.8. Rysa mająca kształt półeliptyczny pracująca na rozciąganie i zginanie

Fig.8. The crack having a semi-elliptical shape working under tensile and flexural strength

W tabeli 8 przedstawiono zestawienie współczynników korekcyjnych „f”, które zostały wyliczone metodą elementów skończonych przez Raju i Newmana. Współczynnik intensywności naprężeń (niem. „Spannungsintensitätsfaktor”) dla półeliptycznej rysy zmęczeniowej na powierzchni na tarczy podlegającej rozciąganiu lub płycie podlegającej naprężeniom zginającym można wyznaczyć na podstawie wzoru empirycznego:

Table 8 summarizes the correction factors "f", which were calculated using the finite element method by Raju and Newman

$$K_I = (\sigma_{ZNOM} + M^* \cdot \sigma_{hNOM}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot f_I} \quad (3)$$

gdzie:

$$f_I = \frac{M}{E(k)} \quad (4)$$

Wyraz E(k) określa się za pomocą wzoru:

$$E(k) = \int_{\alpha=0}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-k^2 \cdot \sin^2 \alpha} \cdot d\alpha \approx \sqrt{1+1,464 \cdot \left(\frac{a}{c}\right)^{1,65}} \quad (5)$$

gdzie:

$$k^2 = 1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2 \quad (6)$$

Współczynnik korekcyjny M można wyznaczyć ze wzoru:

$$M = \left[M_1 + M_2 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \cdot M_4 \cdot M_5 \cdot M_6 \quad (7)$$

$$M_1 = 1,13 - 0,09 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) \quad (8)$$

$$M_2 = \frac{0,89}{0,2 + \frac{a}{c}} - 0,54 \quad (9)$$

$$M_3 = 0,5 - \frac{1}{0,65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{24} \quad (10)$$

$$M_4 = 1 + \left[0,1 + 0,35 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right] \cdot (1 - \sin \phi)^2 \quad (11)$$

Zestawienie współczynników korekcyjnych f do określenia współczynników intensywności dla półeliptycznych rys powierzchniowych według zależności (2) przy nominalnym obciążeniu normalnym dla a/t = 0,2 wg obliczeń według RAJU i NEWMANA [2]

Tabela 8

Summary of correction factors f to determine the intensity factors for semi-elliptical surface cracks according to equation (2) at nominal load for a/t = 0.2 according to calculations by RAJU and NEWMAN [2]

Table 8

φ	a/c=0,6		a/c=1,0		a/c=2,0	
	φ _{geom}	f	φ _{geom}	f	φ _{geom}	f
0,00°	0,00°	0,717	0,00°	0,747	0,00°	0,347
11,25°	6,81°	0,720	11,25°	0,729	21,69°	0,336
22,50°	13,96°	0,738	22,50°	0,703	39,64°	0,313
33,75°	21,85°	0,769	33,75°	0,689	53,19°	0,293
45,00°	30,96°	0,802	45,00°	0,679	63,43°	0,273
56,25°	41,92°	0,829	56,25°	0,674	71,53°	0,253
67,50°	55,38°	0,851	67,50°	0,670	78,30°	0,233
78,75°	71,36°	0,865	78,75°	0,668	84,32°	0,216
90,00°	90,00°	0,869	90,00°	0,668	90,00°	0,209

$$M_5 = \left[\sin^2 \phi + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \cdot \cos^2 \phi \right]^{0,25} \quad (12)$$

$$M_6 = \sqrt{\frac{1}{\cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{c}{b} \cdot \sqrt{\frac{a}{t}} \right)}} \quad (13)$$

$$M^* = M_1^* + (M_2^* - M_3^*) \cdot \sin \phi \quad (14)$$

$$p = 0,2 + \left(\frac{a}{c} \right) + 0,6 \cdot \left(\frac{a}{t} \right) \quad (15)$$

$$M_1^* = 1 - 0,34 \cdot \left(\frac{a}{t} \right) - 0,11 \cdot \left(\frac{a}{c} \right) \cdot \left(\frac{a}{t} \right) \quad (16)$$

$$M_2^* = 1 - \left(1,22 + 0,12 \frac{a}{c} \right) \cdot \left(\frac{a}{t} \right) + \left[0,55 - 1,05 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{0,75} + 0,47 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{1,5} \right] \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 \quad (17)$$

Warunki brzegowe dla podanych zależności wg Newmana i Raju:

$$0 < \frac{a}{c} \leq 1,0 \quad (18)$$

$$0 \leq \frac{a}{t} < 1,0 \quad (19)$$

$$\frac{c}{b} < 0,5 \quad (20)$$

$$0 \leq \phi \leq \pi \quad (21)$$

Naprężenie w rysie zmęczeniowej o kształcie półeliptycznym na głębokości x od powierzchni zewnętrznej wynosi:

$$\sigma(x) = \sigma_{NOM} \cdot \exp \left(-g \cdot \frac{x}{t} \right) \quad (22)$$

Współczynnik korekcyjny K_f wyznacza się na podstawie zależności:

$$K_f = \sigma_{NOM} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f \quad (23)$$

oraz

$$f = \frac{M}{E(k)} \quad (24)$$

Współczynniki korekcyjne M dla pół-eliptycznych rys zmęczeniowych na powierzchni są przedstawione w tabeli 9.

Współczynnik korekcyjny M można wyznaczyć również na podstawie funkcji regresji wg zależności:

The stress intensity factor (Ger. "Spannungsintensitätsfaktor") for semi-elliptical fatigue cracks on the surface on the disc subject to tension or board subject to bending stresses can be determined based on the empirical formula:

$$K_I = (\sigma_{ZNOM} + M^* \cdot \sigma_{hNOM}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot f_I} \quad (3)$$

where:

$$f_I = \frac{M}{E(k)} \quad (4)$$

The term E(k) is defined as:

$$E(k) = \int_{\alpha=0}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \alpha} \cdot d\alpha \approx \sqrt{1 + 1,464 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65}} \quad (5)$$

where:

$$k^2 = 1 - \left(\frac{a}{c} \right)^2 \quad (6)$$

Correction factor M can be determined from the formula:

$$M = \left[M_1 + M_2 \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 + M_3 \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right] \cdot M_4 \cdot M_5 \cdot M_6 \quad (7)$$

$$M_1 = 1,13 - 0,09 \cdot \left(\frac{a}{c} \right) \quad (8)$$

$$M_2 = \frac{0,89}{0,2 + \frac{a}{c}} - 0,54 \quad (9)$$

$$M_3 = 0,5 - \frac{1}{0,65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c} \right)^{24} \quad (10)$$

$$M_4 = 1 + \left[0,1 + 0,35 \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right] \cdot (1 - \sin \phi)^2 \quad (11)$$

$$M_5 = \left[\sin^2 \phi + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \cdot \cos^2 \phi \right]^{0,25} \quad (12)$$

$$M_6 = \sqrt{\frac{1}{\cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{c}{b} \cdot \sqrt{\frac{a}{t}} \right)}} \quad (13)$$

$$M^* = M_1^* + (M_2^* - M_3^*) \cdot \sin \phi \quad (14)$$

$$p = 0,2 + \left(\frac{a}{c} \right) + 0,6 \cdot \left(\frac{a}{t} \right) \quad (15)$$

$$M_1^* = 1 - 0,34 \cdot \left(\frac{a}{t} \right) - 0,11 \cdot \left(\frac{a}{c} \right) \cdot \left(\frac{a}{t} \right) \quad (16)$$

$$M_2^* = 1 - \left(1,22 + 0,12 \frac{a}{c} \right) \cdot \left(\frac{a}{t} \right) + \left[0,55 - 1,05 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{0,75} + 0,47 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{1,5} \right] \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 \quad (17)$$

Boundary conditions for the given relations by Newman and Raju:

$$M = \alpha_{00} + \alpha_{01} \left(\frac{a}{c}\right) + \alpha_{02} \cdot \left(\frac{a}{c}\right)^2 + \alpha_{03} \cdot \left(\frac{a}{c}\right)^3 + \left[\alpha_{01} + \alpha_{11} \left(\frac{a}{c}\right) + \alpha_{12} \left(\frac{a}{c}\right)^2 \right] \cdot \left(\frac{a}{t}\right) + \left[\alpha_{20} + \alpha_{21} \cdot \left(\frac{a}{c}\right) + \alpha_{22} \left(\frac{a}{c}\right)^2 \right] \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \quad (25)$$

$$0 < \frac{a}{c} \leq 1,0 \quad (18)$$

$$0 \leq \frac{a}{t} < 1,0 \quad (19)$$

Współczynniki regresji a_{ij} w celu obliczenia współczynnika korekcyjnego M są przedstawione w tabeli 10.

$$\frac{c}{b} < 0,5 \quad (20)$$

Współczynniki dla rys narożnych (niem. Eckrisse) z kształtem eliptycznym od frontu można wyznaczyć wg wzoru Kobayashiego i Enetanya dla jednolitego stanu naprężeń zgodnie z zależnością:

$$0 \leq \varphi \leq \pi \quad (21)$$

The stress in the fatigue crack in the semi-elliptical shape at the depth x from the outer surface is:

$$\sigma(x) = \sigma_{NOM} \cdot \exp\left(-g \cdot \frac{x}{t}\right) \quad (22)$$

$$K_I = \sigma_{NOM,k} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f_k \quad (26)$$

Correction factor K_f is determined based on the relation:

$$K_I = \sigma_{NOM} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f \quad (23)$$

Kształt rysy wraz z przebiegiem naprężeń jest podany na rys.9.

and

$$f = \frac{M}{E(k)} \quad (24)$$

Correction factors M for the semi-elliptic fatigue cracks on the surface are shown in Table 9.

Współczynniki korekty M dla rys o kształcie połowy elipsy na powierzchni obciążonej niejednorodnym obciążeniem rozciągającym [2] Tabela 9

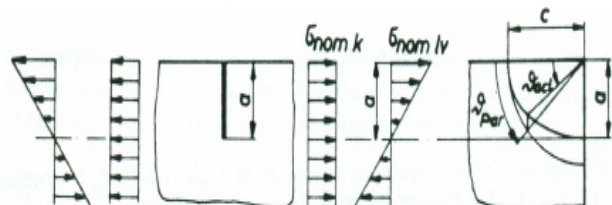
Correction factors M for the fatigue crack in the shape of half an ellipse on the surface subject to a non-uniform tensile load [2] Table 9

g=3,8					g=8,5				
φ=0	a/t				φ=0	a/t			
	0,20	0,40	0,60	0,80		0,20	0,40	0,60	0,80
a/c=0,2	0,54	0,58	0,64	0,73	a/c=0,2	0,48	0,48	0,48	0,51
a/c=0,4	0,67	0,69	0,73	0,78	a/c=0,4	0,58	0,55	0,54	0,54
a/c=0,6	1,02	0,95	0,92	0,91	a/c=0,6	0,88	0,76	0,69	0,66
φ = π/2	a/t				φ = π/2	a/t			
	0,20	0,40	0,60	0,80		0,20	0,40	0,60	0,80
a/c=0,2	0,74	0,63	0,62	0,58	a/c=0,2	0,45	0,33	0,31	0,28
a/c=0,4	0,71	0,55	0,47	0,40	a/c=0,4	0,43	0,27	0,23	0,19
a/c=0,5	0,68	0,49	0,39	0,31	a/c=0,5	0,40	0,24	0,18	0,14
a/c=0,6	0,62	0,43	0,31	0,22	a/c=0,6	0,36	0,20	0,13	0,009

Współczynniki regresji a_{ij} w celu obliczenia współczynnika korekcyjnego M [2] Tabela 10

The regression coefficients a_{ij} in order to calculate a correction factor M [2] Table 10

g=8,5			
φ = π/2	j=0	j=1	j=2
i=0	0,47199	0,79130	-1,06256
i=1	-0,30906	-3,16889	2,84673
i=2	0,21817	2,15632	-2,13073



Rys.9. Rysa narożna o kształcie ćwiartki elipsy w materiale obciążonym naprężeniami zginającymi σ_{nomlv} i naprężeniami rozciągającymi σ_{nomk}

Fig.9. Corner crack of the shape of an ellipse quadrant in the material subject to bending stress and σ_{nomlv} tensile stress σ_{nomk}

W przypadku stanu naprężeń nominalnych zmieniających się liniowo współczynnik korekcyjny można wyznaczyć z zależności:

$$K_l = \sigma_{nomlv} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f_{lv} \quad (27)$$

Współczynniki korekcyjne f_k i f_{lv} są zebrane w tabeli 11.

Jak wynika z przedstawionych wzorów naprężenia w sąsiedztwie rysy zmęczeniowej można precyzyjnie określić, niezależnie od jej kształtu oraz lokalizacji. Obliczenia naprężeń są na tyle precyzyjne, że można prognozować rozwój rysy w trakcie eksploatacji.

Jednym z parametrów określających trwałość rysy jest prędkość pęknięcia, którą można opisać zależnością:

$$\frac{dl}{dN} = f(\sigma, l, C, R) \quad (28)$$

gdzie:

- l- długość pęknięcia
- dl- przyrost długości pęknięcia
- N- ilość cykli przykładanych obciążeń
- dN- przyrost cykli przykładanych obciążeń
- σ -naprężenie
- C-stała materiałowa
- R- współczynnik asymetrii cyklu

Najczęściej używaną zależnością, używaną w mechanice pęknięcia materiałów wzór Parisa podany w 1957 roku:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (29)$$

gdzie:

- ΔK - zakres współczynnika intensywności naprężeń
 - m-współczynnik doświadczalny
- Zakres współczynnika intensywności naprężeń ΔK można wyznaczyć ze wzoru:

Correction factor M may also be set based on the regression function by the equation:

$$M = \alpha_{00} + \alpha_{01} \left(\frac{a}{c}\right) + \alpha_{02} \left(\frac{a}{c}\right)^2 + \alpha_{03} \left(\frac{a}{c}\right)^3 + \left[\alpha_{01} + \alpha_{11} \left(\frac{a}{c}\right) + \alpha_{12} \left(\frac{a}{c}\right)^2 \right] \left(\frac{a}{t}\right) + \left[\alpha_{20} + \alpha_{21} \left(\frac{a}{c}\right) + \alpha_{22} \left(\frac{a}{c}\right)^2 \right] \left(\frac{a}{t}\right)^2 \quad (25)$$

The regression coefficients a_{ij} in order to calculate the correction coefficient M are shown in Table 10.

The coefficients for the corner cracks (Ger. Eckrisse) of the elliptical shape of the front can be determined according to the formula of Kobayashi and Enetanya for uniform stress state according to the relation:

$$K_l = \sigma_{NOM,k} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f_k \quad (26)$$

Shape of cracks along with the stress is given on Fig.9. In the event of a nominal stress changing linearly the correction factor can be determined from:

$$K_l = \sigma_{nomlv} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f_{lv} \quad (27)$$

Correction factors f_k and f_{lv} are shown in Table 11.

As follows from the equations stress in the vicinity of the fatigue cracks can be accurately determined regardless of their shape and location. Stress calculations are so precise that it is possible to predict the development of cracks during the operation.

One of the parameters determining the durability of the cracks is the speed of cracking, which can be described by equation:

$$\frac{dl}{dN} = f(\sigma, l, C, R) \quad (28)$$

where:

- l- crack length
- dl- crack length growth
- N- the number of load cycles
- dN- the growth of load cycles

Współczynniki korekcyjne f_k i f_{lv} dla rys narożnych dla zależności (26) i (27) [2]

Tabela 11

Correction factors f_k and f_{lv} for corner cracks for the relations (26) and (27) [2]

Table 11

ϕ	$\frac{a}{c} = 0,2$			$\frac{a}{c} = 0,4$			$\frac{a}{c} = 0,98$		
	Φ_{geom}	f_k	f_{lv}	Φ_{geom}	f_k	f_{lv}	Φ_{geom}	f_k	f_{lv}
2,5°	0,50°	0,519	-	1,00°	0,692°	-	2,45°	0,833°	-
5,0°	1,00°	0,559	0,394	2,00°	0,726°	0,533°	4,90°	0,844°	0,590
7,5°	1,51°	0,583	0,405	3,01°	0,735	0,523	7,35°	0,838	0,573
10°	2,02°	0,603	0,422	4,03°	0,727	0,516	9,80°	0,825	0,554
20°	4,16°	0,690	0,472	8,28°	0,733	0,498	19,63°	0,765	0,484
30°	6,59°	0,759	0,471	13,00°	0,758	0,468	29,50°	0,721	0,415
40°	9,53°	0,874	0,436	18,55°	0,790	0,439	39,43°	0,700	0,367
50°	13,41°	0,874	0,380	25,49°	0,835	0,403	49,43°	0,696	0,327
60°	19,11°	0,937	0,339	34,72°	0,893	0,380	59,90°	0,717	0,297
70°	28,79°	1,012	0,336	47,70°	0,972	0,362	69,63°	0,757	0,270
80°	48,60°	1,120	0,381	66,21°	1,061	0,377	79,80°	0,813	0,242
82,5°	55,65°	1,153	0,398	71,78°	1,076	0,397	82,35°	0,825	0,235
85,0°	66,37°	1,189	0,420	77,66°	1,092	0,397	84,90°	0,842	0,226
87,5°	77,69°	1,210	-	83,77°	1,107	-	87,45°	0,842	-

$$\Delta K = K_{MAX} - K_{MIN} = \Delta\sigma\sqrt{l} = 2\sigma_a\sqrt{l} \quad (30)$$

gdzie:

K_{MAX} - największy współczynnik intensywności naprężeń,

K_{MIN} - najmniejszy współczynnik intensywności naprężeń,

$2\sigma_a$ -podwójna amplituda naprężeń,

$\Delta\sigma$ - różnica między maksymalnym naprężeniem σ_{MAX} , a minimalnym naprężeniem σ_{MIN} .

5. WNIOSKI

1. Problem wytrzymałości zmęczeniowej kół jest problemem bardzo złożonym i wymaga jeszcze wielu prac analitycznych oraz doświadczalnych. Należy zwrócić szczególną uwagę na skomplikowany układ, który obciąża koło podczas eksploatacji. Szczególnego znaczenia nabiera proces hamowania, jeśli wziąć pod uwagę że wstawki żeliwne typu GG, będą stopniowo zastępowane przez wstawki kompozytowe typu K oraz LL, o wysokim współczynniku tarcia, ale też małej przewodności cieplnej. Wstawki te w istotny sposób zwiększają obciążenie cieplne wieńca koła, powodując stopniowy zanik naprężeń ściskających i powstawanie naprężeń rozciągających. Wstawki kompozytowe typu K i LL są przyszłościowymi elementami wymiennymi, które w najbliższej perspektywie tzn. do 2020 roku powinny w sposób sukcesywny zastąpić wstawki żeliwne GG. Istotną zaletą jest zmniejszenie emisji hałasu podczas jazdy wagonów towarowych do środowiska naturalnego. Wstawki typu LL będą zastępowały wstawki typu GG w istniejących wagonach towarowych, których jest w krajach Unii Europejskiej około 600 000. Wstawki typu K są przeznaczone dla nowo budowanych wagonów towarowych.
2. Kolejnym problemem jaki pojawia się w analizie wytrzymałości kół jest tendencja rozwojowa wagonów towarowych. Wynika z niej że maksymalna prędkość w stanie próżnym będzie wynosiła 120 km/h, natomiast w ładowanym 100 km/h (stan brutto odpowiadający maksymalnemu naciskowi zestawu kołowego na tor, wynoszącemu 22,5 t (klasa toru D) oraz 25 ton (klasa toru E). W takim układzie decydujący udział będzie miał hamulec klockowy. W związku z tym problematyka prawidłowej wytrzymałości zmęczeniowej kół monoblokowych nabiera coraz większego znaczenia, zwłaszcza że wagony towarowe mogą się poruszać w ruchu transeuropejskim, z przekraczaniem granic poszczególnych krajów i rządów europejskich.

σ - stress

C- material constant

R- stress ratio

The most commonly used equation, used in fracture mechanics of materials is the Paris equation formed in 1957:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (29)$$

where:

ΔK - range of stress intensity factor

m- experimental coefficient

The range of the stress intensity factor ΔK can be determined from the formula:

$$\Delta K = K_{MAX} - K_{MIN} = \Delta\sigma\sqrt{l} = 2\sigma_a\sqrt{l} \quad (30)$$

where:

K_{MAX} - the maximum stress intensity factor,

K_{MIN} - the minimum stress intensity factor,

$2\sigma_a$ - double stress amplitude,

$\Delta\sigma$ - the difference between the maximum stress σ_{MAX} , and the minimum stress σ_{MIN} .

5. Conclusions

1. The problem of fatigue strength of wheels is a very complex problem and requires much more analytical and experimental work. Special attention must be paid to the complicated system, which taxes the wheel during operation. Special importance lies in the braking process, when it is considered that the cast iron inserts of GG type, will be gradually replaced by composite inserts K and LL, with a high coefficient of friction, but low thermal conductivity. These inserts significantly increase the heat load of the wheel rim, causing a gradual loss of compressive stress and tensile stress formation. Composite inserts K and LL are future-replaceable elements, which in the near term, i.e. year 2020 should in a gradual manner replace the cast iron GG inserts. A significant advantage is the reduction of noise emissions to the environment when driving freight wagons. LL-blocks will replace GG-blocks in the existing freight wagons, which in the European Union number around 600 000. K-blocks are designed for newly built freight wagons.
2. Another problem that arises in the analysis of the strength of the wheels is the tendency of development in freight cars. It shows that the maximum speed when empty will be 120 km/h, while for the loaded wagons 100 km/h (gross state corresponding to the maximum pressure of the wheelset on the track, equating to 22.5 t (Class D track) and 25 tons (class E track). In this arrangement, the brake-shoe will have a decisive contribution. Therefore, the issue of

3. Przedstawiona problematyka bezpieczeństwa kół monoblokowych w eksploatacji wymaga dotrzymania wymagań w zakresie ich produkcji, zachowując najwyższy możliwy poziom jakości. Zwłaszcza ważne jest utrzymanie prawidłowego rozkładu naprężeń ściskających wieńcu koła, obok innych kryteriów procesów w procesie wytwarzania u producenta. Ważnym elementem procesu poznawczego bezpieczeństwa eksploatacyjnego jest stała kontrola naprężeń ściskających, metodą nieniszcząca za pomocą promieni ultradźwiękowych. Kontrolę ultradźwiękową kół monoblokowych należy przeprowadzać możliwie często na etapach przeglądów konserwacyjno-naprawczych. Wyniki badań powinny być sporządzone w formie protokołu w formie elektronicznej i możliwej do odtworzenia. Koniecznym wydaje się sporządzenie banku danych, dotyczących wyników badań kół monoblokowych przez poszczególne przedsiębiorstwa kolejowe.
4. Ważnym ogniwem w poruszanej problematyce jest stopniowe doskonalenie metod obliczeniowych, dotyczących symulacji propagacji pęknięć zmęczeniowych metodą elementów skończonych, zarejestrowanych w eksploatacji. Proces ten pogłębiłby wiedzę na temat bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Doświadczenia eksploatacyjne dostarczają materiału do walidacji przyjętych metod obliczeniowych.

proper fatigue resilience of monobloc wheels is becoming increasingly important, especially as the wagons can move in the trans-European traffic, crossing the borders of individual countries and European regions.

3. The presented safety problems in operation of monobloc wheels requires keeping requirements for their production, while maintaining the highest possible level of quality. In particular, it is important to maintain the proper distribution of compressive stresses in wheel tread, in addition to other criteria of processes in the manufacturing process at the factory. An important part of the process of cognitive operational safety is a constant control and testing of compressive stress, through a non-destructive method of using ultrasonic rays. Ultrasound controls of monobloc wheels should be done as often as possible on the stages of reviewing maintenance and repair. The test results should be in the form of a protocol in electronic form and accessible. It seems necessary to draw up a data bank of test results for monobloc wheels by individual railway companies.
4. An important link in the discussed issues is the gradual improvement of calculation methods relating to simulation of fatigue cracks propagation in the finite element method, recorded in the operation. This process would deepen the knowledge about the operational safety. Operational experiences provide material for validation of any computational methods adopted.

6. LITERATURA

- [1] Berger P., Minde F.: *Die Besonderheit der Kraftschlussausnutzung zwischen Rad und Schiene beim Bremsen*. ZEV rail. Sonderheft Tagungsband. *Moderne Schienenfahrzeuge. 41. Tagung*. Technische Universität Graz 7 do 10 April 2013.
- [2] Edel K.O.: *Querrisse im Radkranz klotzgebremster Güterwagenvollräder*. Fachhochschule Brandenburg. 1. Auflage. Marzec 1995
- [3] Köhler G., Weber F.J.: *Die Sicherheitsphilosophie bei der Konstruktion, der Produktion und dem Betrieb von Eisenbahnraden*. ZEV rail 135. Tagungsband SFT Graz 2011.
- [4] Murawa F., Weiland M.: *Eigenspannungen klotzgebremster Vollräder – Versuch oder Rechnung?*. Eisenbahningenieur 10.2008.
- [5] Sobaś M.: *Diagnostyka osi zestawów kołowych układów biegowych pojazdów trakcyjnych i tocznych*. Pojazdy Szynowe nr 4/2010
- [6] Sobaś M.: *Zabiegi technologiczne zwiększające żywotność osi zestawów kołowych*. Pojazdy Szynowe nr 1/2011
- [7] Sobaś M.: *Przedsięwzięcia zwiększające prognozowaną żywotność osi zestawów kołowych pojazdów trakcyjnych*. Pojazdy Szynowe nr 4/2011
- [8] Sobaś M.: *Czynniki konstrukcyjne i technologiczne wpływające na żywotność osi zestawów kołowych*. Pojazdy Szynowe nr 3/2012
- [9] Sobaś M.: *Przyczyny pęknięcia osi napędnych oraz tocznych pojazdów w eksploatacji*. Pojazdy Szynowe nr 1/2013.
- [10] Sobaś M.: *Ekspertyza przyczyn pęknięcia osi zestawu kołowego o nr 018457339 w wagonie towarowym węglarce typu EANOS nr 31515350855-3. OR-9514 Praca niepublikowana, przechowywana w archiwum IPS „Tabor”. 03.2009.*

6. LITERATURE

- [11] *Weber F.J.: Auf der Suche nach dem maximalen Radsatzwellen-Torsionsmoment. ZEV Rail Tagungsband Graz 2014.*
- [12] *Karta UIC 505-1: Pojazdy kolejowe. Skrajnia pojazdów. 10-te wydanie z maja 2006.*
- [13] *Karta UIC 510-2: Pojazdy doczepne. Warunki do stosowania kół o różnych średnicach w układach biegowych różnego typu. 4-te wydanie z października 2002 oraz kwietnia 2004.*
- [14] *Karta UIC 510-5: Dopuszczenie kół monoblokowych-zastosowany dokument EN 13979-1.*
- [15] *Karta UIC 813: Warunki techniczne na dostawę zestawów kołowych dla taboru trakcyjnego i wagonów. Tolerancje i montaż.*
- [16] *Karta UIC 832: Warunki techniczne dostawy wstawek klocków hamulcowych z żeliwa fosforowego dla pojazdów trakcyjnych i wagonów. 3-cie wydanie, styczeń 2004.*
- [17] *PN-EN 13103+A2:2012: Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie zestawów kołowych tocznych. Zasady konstrukcji.*
- [18] *PN-EN 13260+A1: 2011: Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Zestawy kołowe Wymagania dotyczące wyrobu.*
- [19] *PN-EN 13261+A1:2011: Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie. Wymagania dotyczące wyrobu.*
- [20] *PN-EN 13262+A2:2011: Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Koła. Wymagania dotyczące wyrobu.*
- [21] *PN-EN 13715+A1:2011: Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Koła. Zewnętrzne zarysy wieńców kół.*
- [22] *PN-EN 13979-1+A2:2011: Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Koła monoblokowe. Procedura dopuszczenia. Część 1: Koła kute i walcowane.*
- [23] *PN-EN 15313:2010: Kolejnictwo. Wymagania eksploatacyjne dotyczące obsługi zestawów kołowych. Utrzymanie zestawów kołowych pojazdów w eksploatacji i wyłączonych z eksploatacji.*