

Paweł PIEC

ZUŻYCIE ZMĘCZENIOWE POWIERZCHNI TOCZNEJ ZESTAWU KOŁOWEGO

Streszczenie. Intensywność zużycia i uszkodzeń badanych obiektów technicznych, określona na podstawie badań diagnostycznych, a zarazem czas bezawaryjnej pracy obiektu do pierwszego uszkodzenia pozwalają na sporządzenie charakterystyk eksploatacyjnych, informujących użytkownika o stanie sprawności technicznej - w odniesieniu do analizowanych parametrów, to znaczący ich wartości początkowej lub dopuszczalnej albo granicznej.

FATIGUE -TESTING USE OF WHEEL SET ROLLING SURFACE

Summary. Wheel sets are the weakest link of rail-vehicle. The operation durability of wheel sets is bounded by wear processes. The researches results of wear processes of selected elements of rail vehicles are inserted in the paper. The leading wear processes are enumerated. The particular attention is paid to fatigue-testing wear of rolling surface of wheel rim. Within the analysis range the problem of fatigue-testing cracks on rolling surface of wheel rim are included.

WPROWADZENIE

Zużycie zmęczeniowe jest jednym z wymienionych w tablicy 2 rodzajów zużycia, gdzie wiodącym procesem jest lokalna dekohezja cząstek materiału wywołana naprężeniami zmęczeniowymi. W celu jednoznacznego określenia procesu zużycia przytoczono niżej dla przykładu jego definicję [1].

Przez zużycie elementu rozumie się trwałe niepożądane zmiany jego stanu, zachodzące w czasie eksploatacji w sposób ciągły lub skokowy, kumulujący się, w wyniku czego okres spełniania przez element określonej funkcji użytkowej stopniowo się wyczerpuje.

Termin „stan elementu” wymaga szerszego wyjaśnienia. A więc stan elementu jest to stan fizyczny, który określają dwie grupy czynników (parametrów):

- czynniki stereometryczne,
- czynniki fizyczne.

Do czynników stereometrycznych zalicza się:

- kształt elementu,
- jego wymiary,
- chropowatość,
- falistość powierzchni,
- kierunkowość śladów obróbki,
- skażenia powierzchni, takie jak:
 - wyżłobienia,
 - wgniecenia,
 - wżery,
 - wykruszenia,
 - pęknięcia i inne uszkodzenia.

Do czynników fizykalnych należy zaliczyć:

- skład chemiczny,
- strukturę (w ujęciu makro, mikro i submikro),
- przestrzenne rozkłady naprężeń,
- twardość i mikrotwardość,
- charakterystykę dyslokacji (chodzi głównie o rozkład gęstości dyslokacji) oraz
- parametry pochodne, którymi są własności mechaniczne, a wśród nich m.in. stopień umocnienia.

Przy obecnym stanie wiedzy wymienione czynniki powinny być brane pod uwagę w badaniach zużycia. Pozostaje natomiast sprawą otwartą, czy są to wszystkie konieczne do uwzględnienia czynniki.

Na postawione pytanie *co to znaczy badać zużycie elementu maszyny?* można odpowiedzieć, że sprowadza się to do badania zmiany *wszystkich* wyżej wymienionych parametrów, charakteryzujących stan fizykalny elementu. Z praktycznego punktu widzenia wystarcza śledzenie zmian tylko tych parametrów, które decydują o możliwości spełniania przez element określonej roli użytkowej.

1. KLASYFIKACJA ZUŻYCIA

Zużycie można klasyfikować w różny sposób, w zależności od przyjętego czynnika klasyfikacyjnego. Dobór czynnika zależy od celu, jakemu ma służyć klasyfikacja. Poniżej przytacza się klasyfikację zużycia ze względu na tzw. wiodące (dominujące) procesy zużycia, obserwowane w praktyce, ujęte w tablicy 1, [2].

Tablica 1

Wiodące procesy zużyciowe i przyporządkowane im odpowiednie rodzaje zużycia

Lp.	Proces wiodący	Rodzaj zużycia
a	b	c
1	Proces mikroskrawania	zużycie ściernie
2	Proces lokalnego zgrzewania	zużycie adhezyjne
3	Proces lokalnej dekohezji cząstek materiału wywołany naprężeniami zmęczeniowymi	zużycie zmęczeniowe
4	Proces deformacji plastycznej	zużycie plastyczne
5	Proces oddziaływania chemicznego	zużycie korozyjne

cd. tablicy 1

a	b	c
6	Proces drażenia ciała stałego przez gaz, ciecz lub wyładowania elektryczne	zużycie erozyjne
7	Proces drażenia ciała stałego przez ciecz uwarunkowany zjawiskiem kawitacji	zużycie kawitacyjne
8	Proces destrukcyjnego oddziaływania ciepła tarcia	zużycie cieplne
9	Inne procesy widzące	inne rodzaje zużycia

Jak widać, klasyfikacja ta nie jest zamknięta i można ją w każdej chwili uzupełnić. Poza tym wszystkie wymienione rodzaje zużycia dzieli się na odmiany.

2. ZUŻYCIE ZMĘCZENIOWE

Można wyróżnić cztery zasadnicze odmiany tego rodzaju zużycia:

- 1) klasyczne zużycie zmęczeniowe,
- 2) zużycie typu pitting,
- 3) zużycie typu spalling,
- 4) zużycie typu fretting,
- 5) zużycie zmęczeniowe - termiczne.

2.1. Klasyczne zużycie zmęczeniowe

Klasyczne zużycie zmęczeniowe - znane powszechnie jako zmęczenie materiału, obejmuje swym zasięgiem nie tylko warstwę wierzchnią elementu, ale zwykle sięga głębiej prowadząc do tzw. złomów zmęczeniowych. Elementy przenoszące obciążenia wielokrotnie okresowo zmienne obciążone są zwykle w sposób złożony. W badaniach wytrzymałościowych zagadnienie upraszcza się i wytrzymałość zmęczeniową materiałów bada się na próbkach obciążonych w sposób możliwie prosty. Najczęściej badamy wytrzymałość zmęczeniową przy obciążeniu próbki zmiennym momentem gnącym lub skręcającym albo zmienną siłą osiową (na pulsatorze).

2.2. Zużycie zmęczeniowe typu pitting

Aby mogło wystąpić zużycie zmęczeniowe typu pitting, muszą zaistnieć następujące podstawowe warunki:

- tarcie toczone z pewnym udziałem poślizgu,
- elementy mogą współpracować w ośrodku smarnym lub bez smarowania,
- elementy muszą być dociskane siłą o określonym zakresie wartości,
- konieczny jest określony czas pracy elementów.

Warunek udziału poślizgu w ujęciu mikro z reguły jest spełniony, ponieważ w praktyce współpracują ze sobą zawsze elementy odkształcalne i w strefie chwilowego bezpośredniego styku występują zawsze mikropoślizgi wywołane naprężeniami kontaktowymi.

Środek smarny odgrywa pomocniczą rolę w przyspieszeniu kształtowania wyrw w obszarze powierzchni kontaktowej. Z praktyki wiadomo, że pittingowi ulegają przede wszystkim koła zębate i elementy łożysk tocznych oraz wieniec koła na powierzchni tocznej zestawów kołowych wagonów wyposażonych w hamulce tarczowe.

2.3. Zużycie zmęczeniowe typu spalling

Jak wykazuje praktyka, zużycie to może zajść w dwóch różnych, gdy idzie o warunki, przypadkach:

- w przypadku obecności ośrodka smarnego,
- bez udziału ośrodka smarnego.

Pierwszy przypadek dotyczy zaawansowanego stadium zużycia typu pitting, w którym poszczególne wyrwy łączą się ze sobą, tworząc stosunkowo rozległe obszary powierzchniowo usuniętego materiału

Drugi przypadek zużycia typu spalling nie wymaga obecności ośrodka smarnego. W tym przypadku jest ważne, aby warstwa wierzchnia jednego z elementów wykazywała w obrębie pewnych obszarów ostry gradient własności fizykalnych. Podstawowym parametrem jest tu stopień umocnienia. Otóż jeżeli na skutek długotrwałego oddziaływania czynników zewnętrznych na element stan jego warstwy wierzchniej (w tym stopień umocnienia) zmienia się w funkcji głębokości warstwy w sposób nagły, możemy obserwować zużycie typu spalling bez udziału ośrodka smarnego. Przykładem może być łuszczenie koła na powierzchni tocznej zestawu kołowego wagonu lub szyny, w pewnych warunkach eksploatacji [2].

2.4. Zużycie zmęczeniowe typu fretting

Taka odmiana zużycia zmęczeniowego może wystąpić w przypadku oddziaływania na elementy dociśnięte wstępnie siłą normalną, dodatkowym obciążeniem normalnym, stycznym lub złożonym, wielokrotnie okresowo zmiennym. Jeżeli dobrać odpowiednio warunki współdziałania elementów, zaobserwować można okiem nieuzbrojonym początkowo barwy nalotowe, a następnie wzrost chropowatości powierzchni elementów w miejscu styku.

Spotykane w praktyce określenie "korozja tarciowa" w odniesieniu do procesów, o jakich mowa, nie jest określeniem precyzyjnym, ponieważ korozja jest tu procesem wtórnym i zachodzącym warunkowo (nie zawsze). Dlatego zamiast terminu "korozja tarciowa" należy używać terminu "zużycie typu fretting".

2.5. Zużycie zmęczeniowe - termiczne

Chodzi w tym przypadku o wpływ naprężeń wielokrotnie okresowo zmiennych, wywołanych powtarzającymi się udarami cieplnymi.

Po odpowiednio długim czasie oddziaływania zmiennych naprężeń cieplnych wywołanych procesem tarcia wstawki klocka hamulcowego dochodzi do charakterystycznych pęknięć zmęczeniowych w wierzchniej warstwie czarnej wieńca koła wagonu. Pęknięcia te rozmieszczone są na całym obwodzie koła na szerokości ograniczonej wartością kontaktu z wstawką hamulcową.

3. PODSTAWOWE ASPEKTY BADAŃ ZUŻYCIA ZESTAWÓW KOŁOWYCH

Przy rozwiązywaniu zagadnień trwałości eksploatacyjnej obiektów technicznych korzysta się z wyników badania procesów fizycznych i chemicznych leżących u podstaw procesów zużycia związanych z utratą ich sprawności technicznej.

Do najważniejszych spotykanych rodzajów zużycia zestawów kołowych należą:

- pęknięcia zmęczeniowe osi,
- pęknięcia zmęczeniowe tarczy koła,
- ścieranie powierzchni tocznej,
- podcięcia obrzeża,
- płaskie miejsca i narosty,
- rozwałcowanie na powierzchni tocznej,
- poluzowanie obręczy,
- pęknięcia zmęczeniowe na powierzchni tocznej,
- wykruszenia zmęczeniowe na powierzchni tocznej,
- owalizacja koła,
- zużycie faliste koła.

Powyższy podział obejmuje te rodzaje zużycia, które pod względem statystycznym stanowią duży procent przypadków, jak i te, które występują rzadziej, ale ze względu na zagrożenie bezpieczeństwa ruchu powinny być również rozpatrywane.

3.1. Pęknięcia zmęczeniowe na powierzchni tocznej

Wartości temperatury nagrzania powierzchni ciernych, jakie można dopuścić w eksploatacji, limitowane są stanem naprężeń w elementach, ich odkształceniami cieplnymi, a także możliwością przemian chemicznych i strukturalnych w metalu. Przy hamowaniu (szczególnie nagłym) najbardziej intensywny wzrost temperatury występuje w wierzchnich warstwach koła (maksimum na powierzchni tarcia). Zachowanie praktycznie niezmienniej średnicy koła przy znacznym nagrzaniu wywołuje naprężenia cieplne ściskające i rozciągające. Naprężenia ściskające mogą przekraczać granicę sprężystości i powodować odkształcenia plastyczne powierzchni tocznej. Po ochłodzeniu w takich przypadkach powstają naprężenia rozciągające. Wielokrotne obciążenie naprężeniami zmieniającymi swój znak może doprowadzić do termicznych pęknięć zmęczeniowych na powierzchni tocznej koła, szczególnie przy przechodzeniu w strefę, w której działają naprężenia rozciągające.

Sumaryczny wzrost naprężeń σ wskutek oddziaływań technologicznych i termicznych przy hamowaniu może być określony ze wzoru (1):

$$\sigma = E \cdot (\varepsilon_n - \alpha_m \cdot \Delta\tau) \quad [\text{MN/m}^2] \quad (1)$$

gdzie:

E - moduł sprężystości materiału przy temperaturze $\Delta\tau$ $[\text{MN/m}^2]$,

ε_n - względne odkształcenie /rozciągnięcie/ wskutek poprzednio działającego stanu naprężeń w kole,

α_m - współczynnik rozszerzalności liniowej $[1/\text{K}]$.

Zależność modułu sprężystości E od temperatury określa wyrażenie (2):

$$E = E_0 - \varphi \cdot \Delta\tau \quad [\text{MN/m}^2] \quad (2)$$

gdzie:

E_o - moduł sprężystości Younga w temperaturze otoczenia,

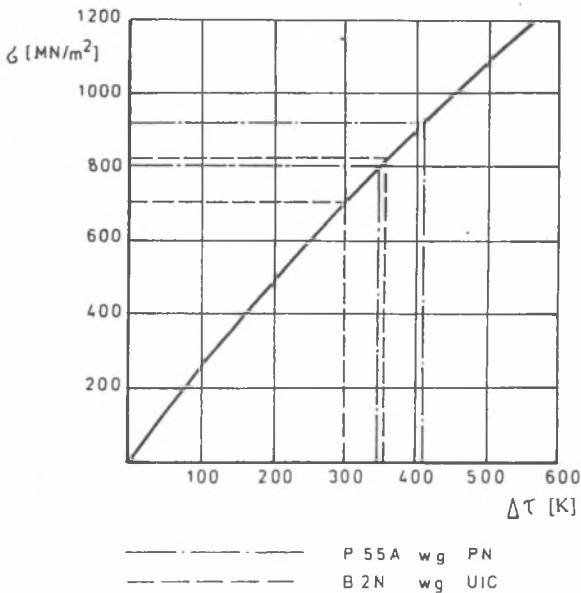
φ - współczynnik uwzględniający zmianę modułu Younga w zależności od temperatury [$\text{MN}/\text{m}^2 \cdot \text{deg}$].

Uwzględniając zależności (1) i (2) określono wzór (3) na obliczenie najwyższej temperatury nagrzania materiału obręczy dla złożonego dopuszczalnego naprężenia σ

$$\Delta\tau = \frac{\alpha_m \cdot E_o + \varphi \cdot \varepsilon_n - \sqrt{(\alpha_m \cdot E_o + \varphi \cdot \varepsilon_n)^2 + 4 \cdot \sigma \cdot \Phi \cdot \alpha_m}}{2 \cdot \varphi \cdot \alpha_m} \quad [\text{K}]. \quad (3)$$

Wyrażenie (1) określające temperaturę w zależności od własności materiału, tj. E_o , φ , α_m , $\Delta\tau$ może służyć jako kryterium wytrzymałości powierzchni toczonej koła na zniszczenia cieplne. Im wyższa wartość $\Delta\tau$, tym materiał koła jest lepszy z punktu widzenia wymagań dla dużych prędkości jazdy.

Na rys.1 przedstawiono wpływ przyrostu temperatury powierzchni cieńszej obręczy na wzrost wartości miejscowych naprężeń, obliczony wg zależności (1) dla $\varphi = 59$ [$\text{MN}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$], przy założeniu $\varepsilon_n = 0$.



Rys.1. Wpływ przyrostu temperatury materiału obręczy na powierzchni cieńszej na wzrost wartości miejscowych naprężeń

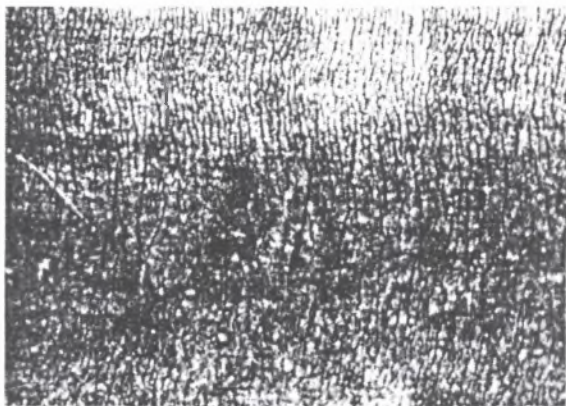
Fig.1. The influence of increase of rim material temperature on frictional surface on increase of partial strain values

Uwzględniając własności wytrzymałościowe materiałów stosowanych na obręcze, np. P55A wg PN-84/H-84027, przyjmuje się jako dopuszczalny przyrost temperatury w strefie przy powierzchniowej 345 ÷ 420 K.

W wyniku miejscowych nagrzań powierzchni cieńszej obręczy, a następnie jej oziębiania, mikrostruktura obręczy ulega pewnym przemianom. Pojawienie się martenzytu w warstwie

wierzchniej świadczy o zahartowaniu materiału. Warstewka utwardzona w warunkach obciążeń dynamicznych jest bardzo podatna na pęknięcia i często im ulega. W czasie kolejnych następnych nagrzań może dojść do odpuszczenia martenzytu i związanej z tym zmiany objętości właściwej. Przy przejściu martenzytu, np. w sorbit, występuje zmniejszenie się objętości właściwej, co wywołuje naprężenia rozciągające w warstwie materiału. W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych naprężeń na powierzchni obręczy pojawiają się drobne pęknięcia poprzeczne, rys.2.

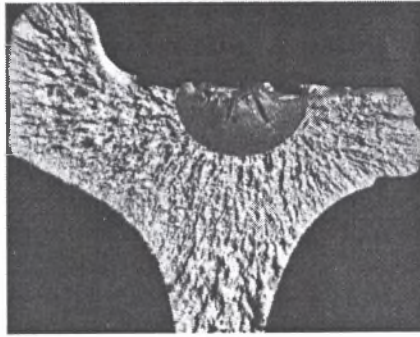
Jeżeli drobne pęknięcia powiększają się w kierunku promieniowym (rys.3) w takim stopniu, że występuje znaczne osłabienie wieńca koła w przekroju poprzecznym, to może dojść do pęknięcia koła, rys.4.



Rys.2. Sieć drobnych pęknięć na powierzchni tocznej obręczy
Fig.2. System of small cracks on rim rolling surface



Rys.3. Przekrój wzdłużny odcinka obręczy z promieniowo przebiegającymi pęknięciami
Fig.3. Longitudinal section of rim segment with radially proceeding cracks



Rys.4. Pęknięcie nawskrośnie koła spowodowane pojawieniem się pęknięć na powierzchni ciernej obręczy
 Fig.4. Crack of the wheel caused by cracks appearance on rim frictional surface

Przedstawione pęknięcia na powierzchni ciernej obręczy pojawiają się szczególnie w przypadkach hamowania z dużych prędkości hamulcem klockowym. Obserwacje własne przeprowadzone w zakładach naprawczych w RFN potwierdziły występowanie tego typu pęknięć poprzecznych na powierzchni ciernej obręczy zestawów kołowych lokomotyw elektrycznych wyposażonych w hamulce klockowe. Lokomotywy te są eksploatowane z prędkościami do 140 km/h. Po przetoczeniu obręczy na głębokość 1 mm zestaw kołowy dopuszczany jest do dalszej eksploatacji.

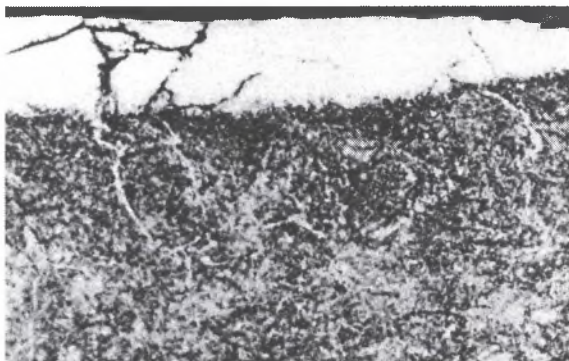
W celu przeciwdziałania pojawiającym się pęknięciom wprowadza się hamulce tarczowe oraz szynowe. W ten sposób zmniejsza się stopień nagrzewania warstwy ciernej obręczy. Również liczne badania kół ze zmodyfikowanych materiałów zmierzają w kierunku zwiększenia odporności na pękanie.

3.2. Wykruszenia zmęczeniowe na powierzchni toczonej

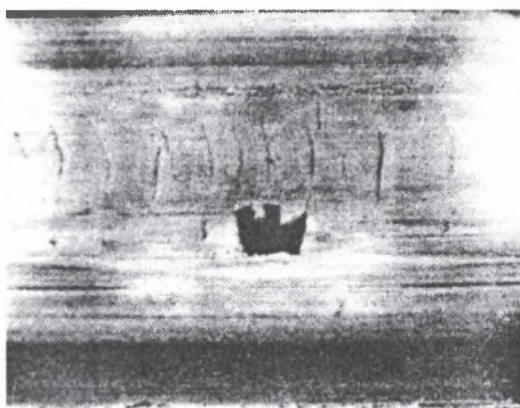
Wykruszenia obręczy są następstwem pęknięć powstałych w wyniku miejscowych nagrzań obręczy oraz pęknięć od miejscowych utwardzeń w wyniku zachodzących zmian strukturalnych materiału, rys.5. Pęknięcia spowodowane utwardzeniem przebiegają (w odróżnieniu od pęknięć w wyniku przekroczenia dopuszczalnych naprężeń na powierzchni ciernej obręczy) bardzo nieregularnie i są ograniczone do tych stref powierzchni toczonej, w których dodatkowo oddziałują naprężenia kontaktowe.

Zmienne naprężenia ścinające powstające w czasie toczenia się obciążonego koła, których maksimum znajduje się na pewnej głębokości pod powierzchnią toczną, są istotną przyczyną utworzenia się pęknięć wewnętrznych, a następnie wykruszeń. Na rys.6 pokazano wycinek obręczy z pojedynczym wykruszeniem.

Zasadniczym sposobem przeciwdziałania tego rodzaju zużyciu jest zmniejszenie obciążeń cieplnych wieńca koła jeźdnego oraz zastosowanie odpowiednich materiałów dla określonych warunków eksploatacyjnych.



Rys.5. Mikrostruktura warstwy wierzchniej obręczy z widocznymi pęknięciami w strefie martenzytycznej
Fig.5. Microstructure of rim upper layer with visible cracks in martensite zone



Rys.6. Wycinek powierzchni tocznej obręczy z pojedynczym wykruszeniem
Fig.6. Segment of rim rolling surface with singular spallig

4. ZAKOŃCZENIE

Przy ustalaniu metodyki badań tej pracy określono procesy wiodące zużycia zestawów kołowych i na tej podstawie zdefiniowano podstawowe cele badań. O stanie technicznym zestawów kołowych decydują różne rodzaje zużycia. Intensywność uszkodzeń zestawów kołowych, określona na podstawie badań diagnostycznych, a zarazem czas ich bezawaryjnej pracy do pierwszego uszkodzenia pozwalają na sporządzenie charakterystyk eksploatacyjnych, informujących użytkownika o stanie sprawności technicznej

Z przeprowadzonej analizy zużycia elementów i zespołów pojazdów szynowych wynika, że zestawy kołowe są najsłabszym ogniwem tego obiektu technicznego.

Trwałość pojazdów szynowych jest więc limitowana trwałością zestawów kołowych - w odniesieniu do analizowanych parametrów, tzn. ich wartości początkowej lub dopuszczalnej albo granicznej.

Literatura

1. Lisowski Z.: Zużycie zmęczeniowe typu pitting, spalling, fretting oraz ciepłno-udarowe wybranych elementów pojazdów szynowych. Wybrane problemy tribologii. PWN, Warszawa 1990, s. 125-137.
2. Piec P.: Zjawiska kontaktowe w elementach pojazdów szynowych. ITE Radom. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Kraków 1999, s. 1-216.

Recenzent: Dr hab. inż. Marek Sitarz
Profesor Politechniki Śląskiej

Abstract

Wheel sets are the weakest link of rail-vehicle. The operation durability of wheel sets is bounded by wear processes. The researches results of wear processes of selected elements of rail vehicles are inserted in the paper. The leading wear processes are enumerated. The particular attention is paid to fatigue-testing wear of rolling surface of wheel rim. Within the analysis range the problem of fatigue-testing cracks on rolling surface of wheel rim are included. That wear is the result, mainly of the friction process of brake-shoe and wheel during braking. That mating has an effect on formation of friction heat. The friction heat is the reason of temperature gradients formation. As a result of formation of high gradients of temperature in upper layers of rim wheel, there appear the fatigue-testing cracks on rim rolling surface. Additionally, the considerable influence on cracks formation on wheel rolling surface has the rolling process of the wheel on the rail. The consolidation grade of wheel material makes in that case an important influence.