

## ZJAWISKA KOROZYJNE I TERMICZNE WYSTĘPUJĄCE PODCZAS TESTÓW TRWAŁOŚCIOWYCH KÓŁ POJAZDÓW WOLNOBIEŻNYCH

Piotr TARASIUK\*, Krzysztof MOLSKI\*, Tomasz KOZIOLKIEWICZ\*, Adam ADAMOWICZ\*,  
Andrzej SZYMANIUK, Barbara FUNKOWSKA\*

\*Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

taras\_p@o2.pl, kmolski@pb.edu.pl, kot@pb.edu.pl, adamow@pb.edu.pl, and.szy@gazeta.pl, funkowska@wp.pl

**Streszczenie:** Praca dotyczy badania zjawisk korozyjnych i termicznych występujących w czasie prowadzenia stanowiskowych testów trwałościowych kół pojazdów wolnobieżnych oraz określenia ich wpływu na wytrzymałość zmęczeniową konstrukcji. Omówiono zjawisko przyspieszonego, intensywnego korodowania obręczy kół, wyjaśniono przyczyny pojawiania się korozji w charakterystycznych miejscach konstrukcji oraz podano sposoby zapobiegania jej występowaniu. Efekty termiczne, w postaci pól temperatury powstających w kole w czasie badań, rejestrowano za pomocą kamery termowizyjnej. Technika ta umożliwiła przeprowadzenie dokładnej analizy pól temperatury w stanie ustalonym i niestabilnym oraz pomogła wyjaśnić przyczyny powstawania procesów korozyjnych ujawniających się podczas prowadzenia stanowiskowych badań trwałościowych kół.

### 1. WPROWADZENIE

Koła jezdne pojazdów wolnobieżnych poddane są w czasie eksploatacji zmiennym obciążeniu, które mogą powodować ich uszkodzenie. Dotyczy to głównie metalowej obręczy, gdzie zwykle pojawiają się pęknięcia zmęczeniowe powodujące utratę szczelności i spadek ciśnienia w kole wyposażonym w bezdętkową oponę. Obowiązujące przepisy wymagają od producentów kół przeprowadzenia specjalistycznych badań trwałościowych swoich wyrobów, które powinny potwierdzić ich właściwą jakość. Badania doświadczalne wybranych losowo kół (full scale testing) realizowane są na specjalnej maszynie bieżnej o regulowanej sile docisku koła do bieżni, z zachowaniem odpowiedniej prędkości obrotowej (PN-S-91240-03:1993, E/ECE/324 E/ECE/TRANS/505, 2008). O wielkości i charakterze obciążeń zadawanych w czasie badań trwałościowych decyduje zarówno średnica bębna maszyny bieżnej, jak i inne szczegółowe wymagania stawiane przez odbiorców produkowanych kół i opon (Mitas Agricultural Data book 2007, PN-S-91240-03:1993, Szymaniuk, 2007). Procedury badawcze są jasno określone i ogólnie polegają na napompowaniu koła do ciśnienia nominalnego i obciążeniu go zadaną siłą promieniową, dociskającą koło do obracającej się bieżni. Po pewnym czasie i liczbie cykli zmian obciążenia, wyrażonej ilością obrotów obciążonego koła, następuje zwykle spadek ciśnienia w oponie spowodowany ucieczką powietrza przez powstające w obręczy pęknięcie zmęczeniowe, co jest równoznaczne z zakończeniem testu.

Prowadzone w ten sposób badania doświadczalne są z założenia przyspieszonymi badaniami niszczącymi, przebiegającymi przy względnie wysokim obciążeniu, zbliżonym w krańcowym przypadku do nośności opony. Chociaż przebieg każdego testu stanowiskowego znacząco różni się pod względem wartości, kierunku i częstotliwości zadawanego obciążenia od rzeczywistych obciążeń eksploatacyj-

nych koła jezdne, to przyjęty system badań podyktowany jest względami ekonomicznymi i umożliwia względnie szybką, porównawczą ocenę jakości produktu.

Koła przeznaczone do badań trwałościowych różnią się od kół handlowych brakiem wszelkich powłok zabezpieczających materiał obręczy z zewnątrz i od wewnątrz przed oddziaływaniem środowiska. Dzięki temu możliwa jest łatwa wzrokowa lokalizacja miejsc powstawania pęknięć oraz kontrola procesu pęknięcia zmęczeniowego materiału, czyli położenia „potencjalnego najsłabszego ogniw trwałościowego” w badanej konstrukcji. Poza tym wyniki badań nie są zakłócone obecnością dodatkowej warstwy materiału, który należałoby kontrolować pod względem jakościowym i ponosić koszty jego nakładania i suszenia, co przy badaniach niszczących kół byłoby ekonomicznie nieuzasadnione.

W czasie stanowiskowych badań trwałościowych nowej serii kół jezdnych typu 9x15,3 o zmienionej konstrukcji tarczy stwierdzono, na wewnętrznej stronie stalowej obręczy, obecność wyraźnego pasma korozji, która nie występowała wcześniej w innych badanych kołach tego typu.

Celem pracy jest wyjaśnienie przyczyn powstawania korozji w czasie badań, ustalenie jej ewentualnego wpływu na trwałość zmęczeniową badanych kół oraz zaproponowanie metod ograniczających jej występowanie.

### 2. ZJAWISKA TOWARZYSZĄCE BADANIOM TRWAŁOŚCIOWYM KÓŁ

#### 2.1. Przebieg badań

Na stanowisku badawczym, przedstawionym na rysunku 1, przeprowadzono badania trwałościowe kół 9x15,3 o ulepszonej konstrukcji tarczy (zmienionej sztywności). Przed przystąpieniem do badań trwałościowych koło zostało napompowane do ciśnienia nominalnego powietrzem

pochodzącym z ogólnozakładowej sieci pneumatycznej firmy Pronar, a następnie zamocowane poziomo w głowicy badawczej, za pośrednictwem której zadawana jest odpowiednia siła dociskająca je do obrotowej bieżni o średnicy 2400 mm. Prędkość obwodowa bieżni w czasie badań wynosiła 40 km/godz.



Rys. 1. Maszyna bieżniowa z badanym kołem zamocowanym w pozycji horyzontalnej

Badania doświadczalne prowadzono w jednozmianowym systemie pracy. Oznacza to, że dzienny cykl badawczy trwał nieprzerwanie około 8 godzin, po czym następowała przerwa w badaniach na kolejnych 16 godzin. Ponieważ badane nowe koła charakteryzowały się dobrą jakością i wysoką trwałością zmęczeniową, nie ulegały one uszkodzeniom zmęczeniowym pomimo przeniesienia ponad trzech milionów cykli obciążenia, co odpowiadało kilkutygodniowemu okresowi badania każdej sztuki. W przypadku wcześniejszych konstrukcji kół trwałość zmęczeniowa była około trzykrotnie niższa.

## 2.2. Zjawiska korozyjne

Badania przerwano po osiągnięciu 3200 tysięcy cykli obciążenia. Po zdjęciu opony stwierdzono na wewnętrznej powierzchni koła obecność szerokiego pasma korozji położonego obwodowo wzdłuż środkowej i górnej części obręczy (rysunek 2a). Podobne zjawisko nie występowało wcześniej przy badaniach takiego samego typu kół różniących się od obecnych jedynie konstrukcją tarczy.

W poszukiwaniu przyczyn i warunków powstawania zjawisk korozyjnych wewnątrz koła, przeprowadzono badania stanowiskowe kolejnego egzemplarza. Po okresie 9 – 10 dni badań, w czasie których obciążone koło wykonało ponad 1600 tysięcy obrotów, stwierdzono, po zdjęciu opony, wąskie pasmo korozji zlokalizowane w środkowej części przetłoczenia obręczy (rysunek 2b)) w miejscu płózenia strefy wpływu ciepła powstałej w procesie spawania obu metalowych części koła, wyraźnie widocznej na wewnętrznej powierzchni obręczy po przeciwnej stronie spoiny. Ze względu na wcześniejszą obecność czynników chemicznych na powierzchni tłoczony blachy oraz występowanie silnego źródła ciepła w czasie spawania, założono hipotetyczne istnienie zmian w strukturze materiału w strefie wpływu ciepła, będących potencjalną przyczyną zwiększonej podatności korozyjnej materiału.



a)



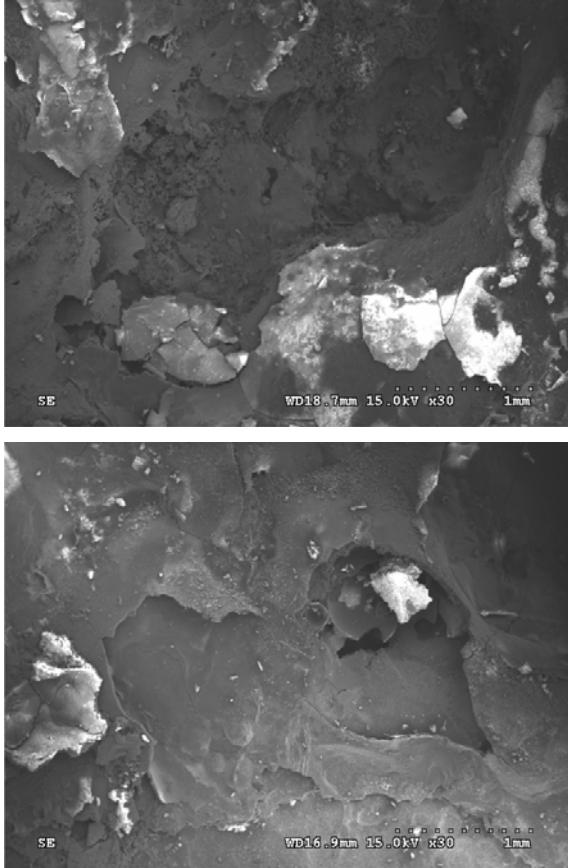
b)

Rys. 2. Pasma korozji w górnej a) oraz środkowej b) części obręczy, zauważone po zdjęciu opony z badanego koła

Pobrano próbki materiału obręczy ze strefy wpływu ciepła z ogniskami korozji i poddano je analizie mikroskopowej oraz badaniom składu chemicznego przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego. W badaniu nie stwierdzono istotnych różnic w składzie chemicznym materiału w stosunku do wymagań normatywnych, ani do składu wyszczególnionego w karcie katalogowej materiału, załączonej przez producenta stali użytej do wyrobu obręczy (PN-EN 10111:2008, PN-EN 10139:2001). Nie zauważono również istotnych zmian strukturalnych materiału ani róż-

nic w składzie chemicznym w odniesieniu do materiału rodzimego.

Na rysunku 3 przedstawiono zdjęcia obszaru objętego korozją, wykonane za pomocą mikroskopu skaningowego przy 30-krotnym powiększeniu. Widoczne są charakterystyczne ciemne „łuski” korozji, uniesione ponad pierwotną powierzchnię obręczy, oraz jaśniejsze miejsca nieskorodowanej stali odpowiadające powierzchni pierwotnej.



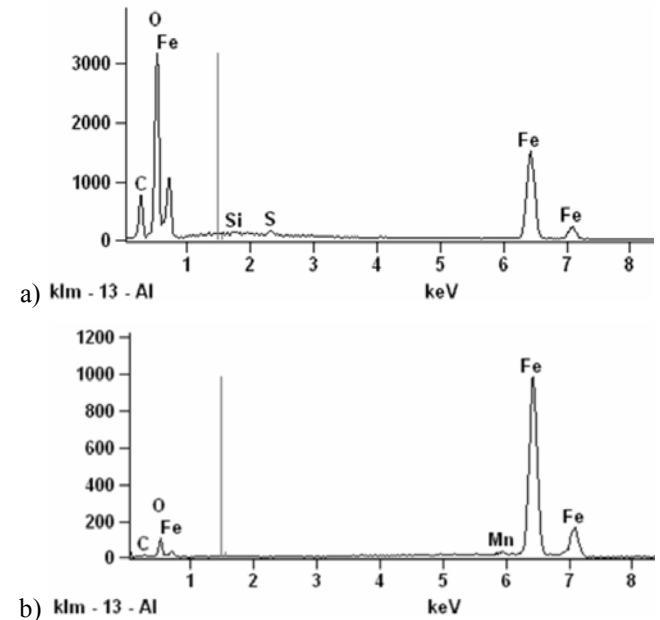
**Rys. 3.** Widok mikroskopowy obszarów korozji przy powiększeniu 30-krotnym – widoczne są charakterystyczne ciemne „łuski” korozji oraz jaśniejsze miejsca stali nie objętej korozją



**Rys. 4.** Ogniska korozyjne w przetłoczeniu obręczy. Na podstawie cech charakterystycznych zakwalifikowano ją jako korozję tlenkową

Analiza wizualna powstałych ognisk korozyjnych, przedstawionych na rysunku 4, pozwoliła zakwalifikować korozję jako tlenkową, ze względu na charakterystyczną brunatną barwę, kształt i formę obszaru skorodowanego.

Kwalifikację taką potwierdziła analiza spektralna wykonana za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego. Wyniki tej analizy dla obszaru pochodzącego ze strefy korozji oraz dla materiału pozbawionego korozji, przedstawiono na rysunku 5.



**Rys. 5.** Porównanie składu chemicznego strefy skorodowanej a) i nieskorodowanego b) materiału obręczy, otrzymane metodą spektroskopii elektronowej

Wyniki przeprowadzonych badań dowiodły, że przyjęte wcześniej założenie łączące zjawisko korozji ze zmianami strukturalnymi materiału obręczy okazało się błędne. Przyczyna powstałej korozji musiała leżeć gdzie indziej i była niezależna od struktury i składu chemicznego materiału.

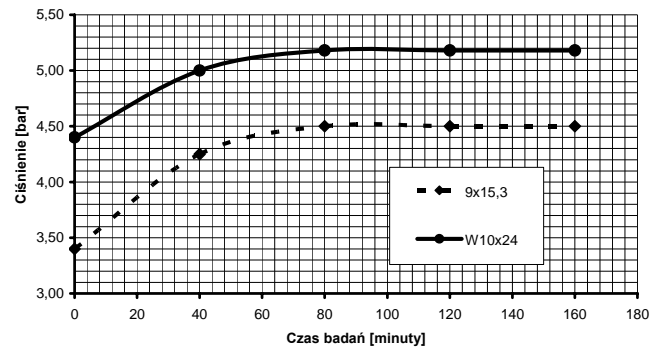
### 2.3. Zjawiska termiczne

W czasie prowadzenia stanowiskowych badań trwałościowych różnych typów kół, niezależnie od konstrukcji i rodzaju opony, zawsze występuje wzrost ich temperatury. Pomiar ciśnienia powietrza w oponach, zarówno badanego obecnie koła 9x15,3 jak i badanego równoległe koła typu W10x24 o innej wielkości i zarysie obręczy, wykazały stopniowy wzrost spowodowany nagrzewaniem. Ciśnienie stabilizowało się po upływie około 80 minut od rozpoczęcia badań, po osiągnięciu wartości maksymalnej wyższej o 0.08MPa do 0.11MPa od ciśnienia nominalnego. Przyrost ciśnienia zależał od rodzaju koła, typu użytego ogumienia, temperatury otoczenia, wielkości obciążenia oraz prędkości obrotowej koła (Luchini, 2000). Zmierzone w czasie badań trwałościowych wartości ciśnienia powietrza w dwóch rodzajach kół typu 9x15,3 i W10x24, przedstawiono na rysunku 6.

Wyniki pomiarów ciśnienia wskazywały, że wzrost temperatury w czasie badań stanowiskowych powoduje zmianę ciśnienia wewnątrz koła, co wpływa nie tylko

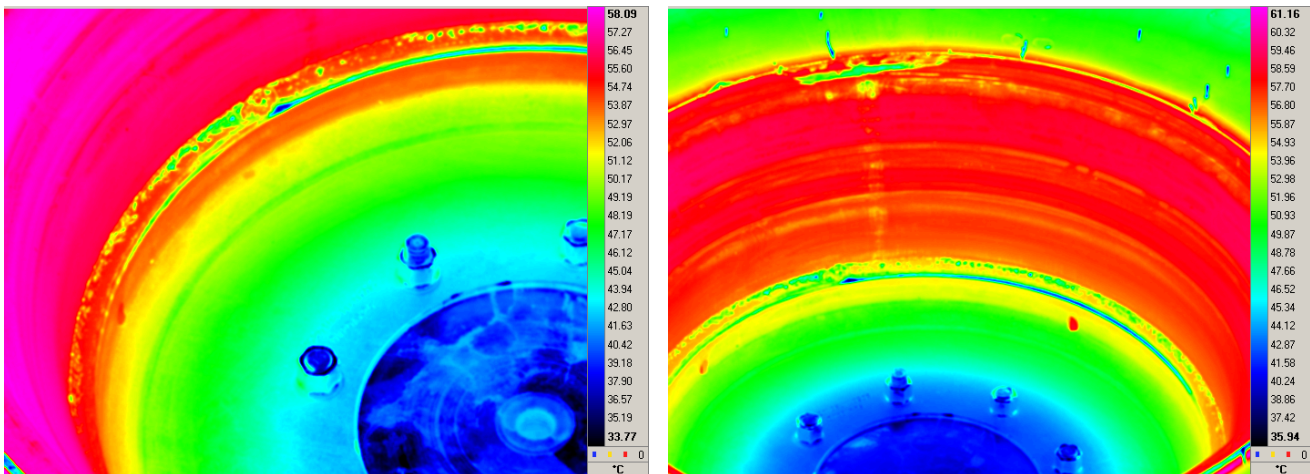
na wartość obciążeń działających na obręcz, ale również na redystrybucję sił na brzegach obręczy w strefie styku ze stopką opony i spowodowane jest zmianą podatności samej opony (Tarasiuk i inni, 2008). W efekcie zmienia się w sposób ilościowy i jakościowy rozkład naprężeń w metalowej części koła.

W celu dokładniejszego określenia zmian temperatury w kole podczas badań stanowiskowych oraz wyznaczenia jej wartości w poszczególnych miejscach koła, zastosowano metodę termowizyjną. Za pomocą kamery termowizyjnej typu Cedis Titanium 56<sup>0</sup>M rejestrowano obrazy emisji fal termicznych na powierzchni koła w różnych fazach badań trwałościowych. Stwierdzono znaczne nagrzewanie się poszczególnych elementów koła oraz występowanie różnych wartości temperatury maksymalnej odpowiadającej warunkom ustalonego przepływu ciepła w poszczególnych obszarach. Najwyższą temperaturę (około 62°C) zawsze osiągała opona, a najniższą (około 34°C) wewnętrzna część tarczy koła, w miejscach połączenia śrubowego z głowicą.



Rys. 6. Przebiegi zmian ciśnienia powietrza w dwóch różnych typach kół, w funkcji czasu od rozpoczęcia badań stanowiskowych

Przykładowe obrazy pól temperatury zarejestrowane w czasie badań, przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Obrazy izoterm badanego koła 9x15.3 po 90 minutach badań (stan ustalony) – widoczny jest promieniowy gradient temperatury wynikający z obwodowego kształtu izoterm, od najcieplejszej opony do najchłodniejszej tarczy w miejscu mocowania

### 3. OMÓWIENIE UZYSKANYCH WYNIKÓW

Na rysunkach 7a i b widoczny jest gradient temperatury, występujący w okolicach połączenia tarczy z obręczą koła oraz przetłoczenia (wygięcia) obręczy. Z punktu widzenia termomechaniki, tarcza koła pełni rolę chłodzącego żebra i powoduje lokalne obniżenie temperatury obręczy w miejscu ich wzajemnego połączenia. W strefie tej, po zatrzymaniu maszyny bieżnej, panują najkorzystniejsze warunki do szybkiego obniżenia temperatury, co powinno powodować zlokalizowaną kondensację pary wodnej znajdującej się w powietrzu wewnątrz koła.

Potwierdzenie powyższej hipotezy wymagało przeprowadzenia dodatkowych pomiarów i obliczeń warunków wystąpienia punktu rosy w badanym kole napompowanym powietrzem do ciśnienia nominalnego. Do pomiarów wilgotności powietrza zastosowano metodę psychometryczną. Po zmierzeniu temperatury powietrza używanego do pompowania koła, za pomocą termometru suchego i mokrego, wyznaczono wilgotność względną powietrza z wykresu Moliera oraz obliczono ilość zawartej w nim wilgoci

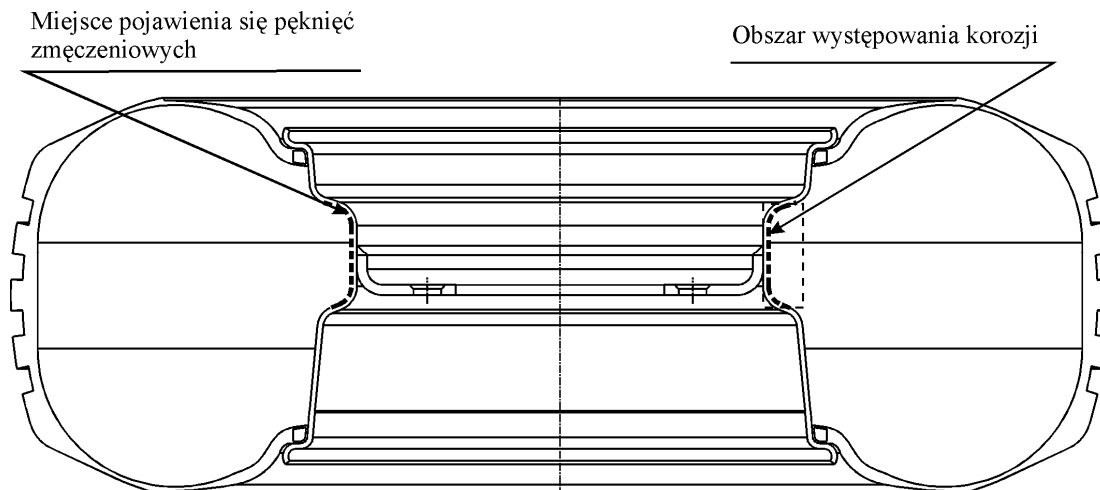
(0.0123kg wody/kg suchego powietrza). Następnie wyznaczono temperaturę punktu rosy, wynoszącą około 46°C, dla warunków panujących wewnątrz koła. Wartość ta jest bliska temperaturze tarczy koła w pobliżu miejsca jej połączenia z obręczą, zmierzonej w czasie badań stanowiskowych (rysunek 7). Oznacza to, że w krótkim czasie po zatrzymaniu maszyny bieżnej zachodzą wewnątrz koła, w miejscu mocowania tarczy, warunki umożliwiające zlokalizowaną kondensację wilgoci. Oznacza to, że skroplona na wąskim obszarze wilgoć, w obecności tlenu znajdującego się w napompowanym kole, sprzyja powstawaniu ognisk korozyjnych. W czasie ponownego nagrzewania się koła w kolejnym dniu badań, następuje odparowanie wilgoci ze ścianki obręczy, poprzedzające kolejną fazę kondensacji pary w czasie stygnięcia koła. Proces ten zachodzi w każdym cyklu termicznym odpowiadającym jednemu dniu badań i związany jest z okresowym nagrzewaniem i stygnięciem badanego elementu. Wysoka jakość zmienionego konstrukcyjnie koła i brak pęknięć zmęczeniowych sprawiły, że możliwe stało się zrealizowanie kilkudziesięciu cykli termicznych potęgujących efekty korozyjne w środkowej części obręczy. Badane wcześniej koła typu 9x15,3 o innej

konstrukcji tarczy miały wielokrotnie niższą trwałość i pękały znacznie wcześniej, dlatego omawiane zjawiska korozyjne nie mogły się w nich ujawnić z powodu zbyt małej liczby cykli termicznych. Pokrywanie się obszaru powstawania korozji ze strefą wpływu ciepła, utworzoną podczas spawania tarczy z obręczą, wynika z korzystniejszych warunków stygnięcia tego miejsca po zatrzymaniu maszyny bieżnej, a nie ze zmian strukturalnych czy chemicznych materiału spowodowanych spawaniem, ułatwiających korozję.

Stwierdzone występowanie większej strefy korozji w górnej części obręczy niż w dolnej, spowodowane jest poziomym ułożeniem koła w czasie badań. Górna część koła ma wtedy korzystniejsze warunki przekazywania cie-

pła do otoczenia niż część dolna, ograniczona od góry poziomą tarczą, dlatego w dolnej części obręczy proces kondensacji wilgoci w czasie stygnięcia koła oraz utlenianie materiału zachodzą wolniej.

Z punktu widzenia trwałości badanych kół, najbardziej niekorzystny przypadek ma miejsce wówczas, gdy strefa korozji „wchodzi” na strefę występowania największych zakresów zmian naprężeń, znajdującą się po wewnętrznej stronie obręczy w miejscu jej zakrzywienia. Procesy zmęczenia materiału zachodzą wówczas znacznie szybciej i są wzmacniane lokalną obecnością ognisk korozyjnych tworzących niewielkie karby powierzchniowe. Przypadki takie, pokazane schematycznie na rysunku 8, wystąpiły w czasie badań.



Rys. 8. Schematyczny przekrój koła badanego w położeniu horyzontalnym z zaznaczonym linią kreskową obszarem występowania korozji

W celu uniknięcia występowania korozji w czasie kolejnych badań stanowiskowych kół, prowadzonych bez stosowania powłok ochronnych, powietrze wewnątrz koła zostało zastąpione czystym technicznie azotem. Efekty korodowania kół uległy istotnemu zmniejszeniu, ale nie zostały całkowicie wyeliminowane. Konieczny w procesie korozji tlen pozostawał w kole zanim został wprowadzony azot i chociaż występował w ilości około pięciokrotnie mniejszej niż poprzednio (koło zostało napompowane do ciśnienia około 4 atmosfer), zdołał uaktywnić się w procesie utleniania stali. Powstałe tym razem ogniska korozji były znacznie mniejsze i płytsze niż poprzednio i dały się łatwo usunąć za pomocą flaneli. Parokrotne przedmuchiwanie wnętrza koła azotem przed ostatecznym jego napompowaniem powinno w przyszłości znacząco zmniejszyć ilość tlenu pozostającego w kole i wyeliminować omawiane zjawisko powstawania korozji w czasie stanowiskowych badań trwałościowych.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Efekty korozyjne, w postaci obwodowego pasma rdzy występującego na powierzchni stalowej obręczy koła w obszarze ograniczonym bezdętkową oponą, są ściśle związane z kilkoma charakterystycznymi czynnikami występującymi w czasie przyspieszonych badań stanowiskowych kół pojazdów wolnobieżnych. Pierwszy z nich wyni-

ka ze stosowania okresowego (dziennego) harmonogramu badań, powodującego cykle termiczne związane z nagrzewaniem się (do temperatury 62<sup>0</sup>C) i chłodzeniem badanego koła do temperatury otoczenia (18<sup>0</sup>-20<sup>0</sup>C). Taki sposób postępowania sprzyja cyklicznej kondensacji pary wodnej wewnątrz koła, zwłaszcza w środkowej części obręczy, i zapoczątkowuje proces powstawania korozji. Analiza badanych kół wykazała, że pierwsze ślady korozji wystąpiły w środkowej części obręczy, w miejscu jej spawania z tarczą, po około 8-10 cyklach termicznych, natomiast uogólniony proces korozyjny, rozszerzony na znaczną część obręczy, wymagał około 30 cykli nagrzewania i chłodzenia koła. W procesie tym tarcza pełni rolę żebra chłodzącego, wspomagając wymianę ciepła z otoczeniem i lokalizując zapoczątkowanie korozji w środkowej części obręczy. Drugi istotny czynnik polega na stosowaniu w badaniach kół wykonanych z blachy stalowej niezabezpieczonej przeciwko korozji, co wynika z metodyki badań, konieczności lokalizacji pęknięć zmęczeniowych jak i względów ekonomicznych. Trzecim czynnikiem jest wysoka jakość badanych kół, zapewniająca podwyższoną trwałość zmęczeniową umożliwiającą poddanie konstrukcji około trzydziestu cyklom termicznym przed pojawieniem się pęknięć zmęczeniowych.

Występowanie początkowego pasma rdzy po przeciwnej stronie spiny łączącej obręcz z tarczą nie było związane, jak początkowo sądzono, ze zmianami strukturalnymi materiału spowodowanymi procesem spawania, ale wyni-

kało z samej obecności przyspawanej tarczy działającej jak chłodzące zebro stwarzające korzystniejsze warunki do skraplania się w tym właśnie miejscu wilgoci zawartej w powietrzu użytym do napompowania koła.

Powstająca korozja może powodować przyspieszone pęknięcie zmęczeniowe materiału, jeżeli występuje w miejscach stanowiących „najłabsze ogniwo trwałościowe” konstrukcji. Są nimi np. krzywizny wewnętrznych powierzchni obręczy, stanowiące naturalny koncentrator naprężenia.

Wskazane jest unikanie występowania zjawisk korozyjnych w czasie badań trwałościowych kół. Można tego dokonać napełniając je azotem zamiast powietrzem (najlepiej po parokrotnym przedmuchaniu) w celu pozbycia się tlenu. Dobre rezultaty powinno przynieść również prowadzenie badań „non-stop” aż do czasu wystąpienia pęknięć zmęczeniowych, unikając w ten sposób powtarzania cykli termicznych wspomagających procesy korozyjne.

Należy również mieć na uwadze fakt, że na skutek nagrzewania się koła w czasie badań może dojść do znaczącego wzrostu ciśnienia w ogumieniu ponad wartość nominalną, co wywoła dodatkowe obciążenie oraz zmieni rozkład naprężeń w metalowej części koła w wyniku zmiany podatności opony, wpływając tym samym na wyniki stanowiskowych badań trwałościowych.

#### LITERATURA

1. **Bala H.** (2002), *Korozja materiałów: teoria i praktyka*, Wydaw. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
2. **Baszkiewicz J.** (2006), *Korozja materiałów*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
3. **Bolarinwa E. O., Olatunbosun O. A.** (2004), *Finite element simulation of the tire burst test*, School of Engineering, The University of Birmingham, Edgbaston, UK, 1251-1258.
4. **Bolster M. J.A., Joseph T. G.** (2005), *Tire - Rim Interactions for Ultra Class Trucks in The Mining Industry*, *The 19<sup>th</sup> International Mining Congress and Fair of Turkey*, IMCET2005 Izmir Turkey.
5. **Dobrzeński L. A.** (2006), *Materiały inżynierskie I projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, WNT, Warszawa, 461, 554-556.
6. **E/ECE/324 E/ECE/TRANS/505** (2008), *Uniform provisions concerning the approval of pneumatic tires for agricultural vehicles and their trailer*.
7. **ETRTO** (1999), *Standard Manuals*, European Tire and Rim Technical Organization, Belgium Brussels.
8. **Green A. E., Adkins J.E.** (1960), *Large elastic deformations and non-linear continuum mechanics*, Clarendon Press, Oxford.
9. **Hackforth H. L.** (1963), *Promieniowanie podczerwone*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
10. **Holscher H., Tewes M., Botkin N., Lohndorf M., Hoffmann, K. H., Quandt E.** (2004), *Modeling of Pneumatic Tires by a Finite Element Model for the Development a Tire Friction Remote Sensor*, Center of Advanced European Studies and Research (CAESAR), Ludwig-Erhard-Allee 2, 53175 Bonn, Germany.
11. **Jaworski B., Dietlaf A.** (1984), *Procesy falowe. Optyka, fizyka atomowa i jądrowa, Kurs fizyki, tom III*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
12. **Luchini J.** (2000), *Measuring and Modeling of Tire Rolling Resistance*, ITEC 2000.
13. **Madura H.** [red.] (2004): *Pomiary termowizyjne w praktyce*, Miesięcznik Naukowo-Techniczny PAK, Agenda Wydawnicza PAK-u, Warszawa.
14. **Małachowski J.,** (2007), *Numerical study of tires behavior*, Department of Mechanic and Applied Computer Science, Military University of Technology, Warsaw, Poland.
15. **Mancosu F., D. Da Re.** (1998), *Non-linear modal rolling tyre model for dynamic simulation with ADAMS*, Pirelli Pneumatici Spa, D. Minen MDI Italy, European Adams users' conference, Paris.
16. **Mioduszewski P.** (2000), *O oponach informacji kilka*, [www.auto-online.pl](http://www.auto-online.pl).
17. **Mitas Agricultural Data book** (2007), *Agricultural tires. Technical information 2007*, [www.mitas.cz](http://www.mitas.cz).
18. **Oden J. T.,** (1972), *Finite Elements of Nonlinear Continua*, McGraw-Hill, New York.
19. **Ogden R. W., Haughton D. M.** (1978), *Bifurcation of inflated circular cylinders of elastic material under axial loading, I: Membrane theory for thinwalled tubes*, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1979, 27:179-212.
20. **Ogden R. W.** (1997), *Non-linear elastic deformations*, Dover Publications, Minnessota, NY.
21. **Oliferuk W.** (2008), *Termowizja podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń*, Biuro Gamma, Warszawa.
22. **Ostrowska-Maciejewska J.** (1994), *Mechanika ciał odkształcalnych*, PWN, Warszawa.
23. **PN-EN 10111:2008** (2008), *Stal niskowęglowa -- Blachy i taśmy walcowane na gorąco w sposób ciągły, przeznaczone do obróbki plastycznej na zimno - Warunki techniczne dostawy*, PKNMiJ, Warszawa.
24. **PN-EN 10139:2001** (2001) *Taśma wąska niepowlekania walcowana na zimno ze stali niskowęglowych, przeznaczona do obróbki plastycznej na zimno -- Warunki techniczne dostawy*, PKNMiJ, Warszawa.
25. **PN-ISO 4251-3:1999** (1999), *Opony (serie oznaczone liczbą PR) i obręcze do ciągników i maszyn rolniczych, Obręcze*, PKNMiJ, Warszawa.
26. **PN-S-91240-03:1993** (1993), *Koła z ogumieniem pneumatycznym wymagania i badania*, PKNMiJ, Warszawa.
27. **Rudowski G.** (1978), *Termowizja i jej zastosowanie*, Wydawnictwa Telekomunikacji i Łączności, Warszawa.
28. **Shreir L.L.,** (1966), *Korozja metali i stopów*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
29. **Surowska, B.** (2002), *Wybrane zagadnienia z korozji i ochrony przed korozją*, Wydaw. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin.
30. **Szefer G., Jasińska D.** (1995), *Frictional contact of elastic bodies in terms of large deformations*, *Contact Mechanics II* (Aliabadi M.H., Alessandri C. (eds.)), Comp Mech. Publ., 151- 158.
31. **Szefer G., Kędzior D.** (2001), *Dynamics of frictional contact of elastic bodies undergoing large deformations*, *Polska Mech. U progu XXI w.*, PW, Warszawa.
32. **Szymaniuk A.** (2007), *Opracowanie wyników badań rozwojowych koła 9.00x15,3*, Raport techniczny, Laboratorium AB-1 i AB-2, PRONAR, Narew.
33. **Tarasiuk P., Molski K., Funkowska B.,** (2008), *Modelowanie numeryczne kół pojazdów wolnobieżnych*, XVI Francusko-Polskie Seminarium Mechaniki, Politechnika Warszawska, Warszawa.
34. **Tarasiuk P., Szymaniuk A., Adamowicz A., Molski K., Funkowska B.** (2008), *Analiza zjawisk termicznych towarzyszących badaniom stanowiskowym kół jezdnych*, XVI Francusko-Polskie Seminarium Mechaniki, Politechnika Warszawska, Warszawa.
35. **Uhlig H. H.** (1976), *Korozja i jej zapobieganie*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.

36. **Zheng D.** (2006), *Challenges in Tire FEM Simulation*, [http://www.contionline.com/generator/www/start/com/en/index\\_en.html](http://www.contionline.com/generator/www/start/com/en/index_en.html).
37. **Żebrowski J.** (2003), *Flowing Power Analysis of a Wheel Co-operating with the Deformable Ground*, *Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Conference of the ISTVS*, Harper Adams UK.
38. **Żebrowski J., Żebrowski Z.** (2008), *Gestaltung und Automatisierung von Arbeitsprozessen eines Ackerschlepperaggregats zwecks Verbesserung des energetischen Wirkungsgrades seiner Arbeit*, *XX. Deutsch-Polnisches Forum „DEVELOPMENT TRENDS IN DESIGN OF MACHINES AND VEHICLES“*, Warschau.

### **CORROSIVE AND THERMAL PHENOMENA APPEARING IN FULL SCALE TESTING OF WHEELS OF LOW SPEED VEHICLES**

**Abstract:** The present paper deals with the analysis of corrosive and thermal phenomena appearing in full scale testing of wheels of low speed vehicles. It has been shown that the presence of thermal cycles consisting in heating and cooling of the tested wheels increases corrosive processes due to the water condensation at the central part of the rim where the cooling conditions are the most favorable. This process can affect the durability of the wheel, especially in the cases when it additionally overlaps with the weakest point of the structure. In such cases the damage accumulation process significantly increases. Corrosion can be avoided or strongly limited by the use of nitrogen instead of air for inflating wheels or by carrying out the experimental tests in continuous manner, which would eliminate the cooling phase of the test. Intensive heating of the wheels during the tests increases the pressure in the tubeless tire and changes its rigidity. This phenomenon influences the stress distribution in metallic part of the wheel and introduces additional loading to the structure.

**Podziękowanie:** Autorzy dziękują Panu Profesorowi **Dariuszowi Butrymowiczowi** za cenne sugestie dotyczące sposobu pomiaru wilgotności powietrza i wyznaczenia punktu rosy dla warunków panujących wewnątrz badanego koła oraz Pani Dr **Małgorzacie Grądzkiej-Dahlke** za pomoc w interpretacji wyników badań metalograficznych.