

**Grzegorz KINAL<sup>\*</sup>, Marta PACZKOWSKA<sup>\*\*</sup>**

## **WPLYW EKSPLOATACJI NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ SZYN ORAZ OBREŃCZY KÓŁ TRAMWAJOWYCH**

**THE INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON SELECTED  
PROPERTIES OF THE SURFACE LAYER OF THE RAILS  
AND WHEELS OF TRAMS**

### **Słowa klucze:**

obręcze i szyny tramwajowe, warstwa wierzchnia, twardość, chropowatość

### **Key words:**

rims and tram rails, surface layer, hardness, roughness

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań twardości oraz struktury geometrycznej powierzchni wykonanych na wybranych powierzchniach obręczy kół i szyn tramwajowych. Pojazdy, których obręcze badano, należały do Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego w Poznaniu Spółka z o.o. Badania wykazały między innymi wpływ procesu eksploatacji na umocnienie warstwy wierzch-

---

<sup>\*</sup> Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, pl. M. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań, Polska, tel. 61 647 59 46, e-mail: grzegorz.kinal@put.poznan.pl.

<sup>\*\*</sup> Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, pl. M. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań, Polska, tel. 61 647 59 06, e-mail: marta.paczkowska@put.poznan.pl.

niej obręczy i badanych szyn oraz zmiany chropowatości powierzchni tocznej w stosunku do wierzchołka obrzeża obręczy w wyniku eksploatacji.

## WPROWADZENIE

Transport tramwajowy stanowi ważne ogniwo transportu w aglomeracji miasta. O właściwym funkcjonowaniu tego ogniwa decyduje wiele czynników. Jednak biorąc pod uwagę procesy związane z samą eksploatacją techniczną obiektu, zasadnicze znaczenie ma utrzymanie właściwego stanu technicznego elementów, dalej zespołów i w konsekwencji całego skomplikowanego obiektu. W czasie eksploatacji elementów współpracujących w warunkach tarcia tocznego może dochodzić do lokalnego umocnienia ich warstwy wierzchniej [L. 4, 6]. Utwardzenie w obszarze warstwy wierzchniej jest niezwykle istotne dla procesów zużycia zarówno obręczy koła tramwajowego, jak i współpracującej z nim szyny [L. 1]. Badania wskazują, że twardość materiału obręczy koła powinna być większa o około 20% od twardości szyny. W takim przypadku stwierdza się najmniejsze zużycie obu elementów stanowiących parę cierną [L. 6].

Biorąc pod uwagę parę trącą w postaci obręczy i szyny tramwajowej, należy zauważyć, że w czasie eksploatacji mogą następować zmiany struktury geometrycznej powierzchni współpracujących ze sobą elementów, a to z kolei może mieć wpływ na przebieg procesu zużywania pary trącej. Zmiany parametrów struktury geometrii powierzchni tarcia mogą również być oznaką zmian, które zaszły w warstwie wierzchniej elementu – na przykład miejscowego utwardzenia lub procesu powierzchniowego zużywania zmęczeniowego (w wyniku, którego doszło do powierzchniowych ubytków materiału) [L. 2]. Dla taboru kolejowego prowadzone są pomiary chropowatości szyn [L. 5] i wydaje się, że taka diagnostyka byłaby słuszną również w przypadku taboru tramwajowego [L. 2, 3] – nie tylko szyn, a również obręczy i to w trakcie ich pracy.

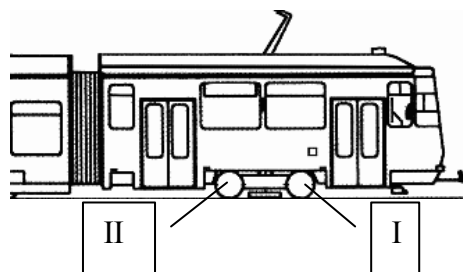
Celem badań była ocena wpływu procesu eksploatacji szyn oraz obręczy kół tramwajowych na twardość i chropowatość ich warstwy wierzchniej.

## METODYKA BADAŃ

Obiektami badań były szyna, gdzie część powierzchni tocznej główki była napawana (dwa fragmenty) oraz obręcze kół tramwajowych eksploatowane przez Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Poznaniu Spółka z o. o. Badane obręcze tramwajowe pochodziły z pojazdów: Solaris Tramino S105P, Siemens Combino, Moderus Beta MF 02 AC, Konstal 105N, Düewag GT8. Badaniom poddano także fragmenty szyn tramwajowych Ri60N zdemontowanych z odcinka prostego wcześniej eksploatowanego.

Obręcze tramwajowe osadzone były wcześniej na kole bosym, tym samym obydwa elementy stanowiły część zestawu kołowego wózka napędowego znajdu-

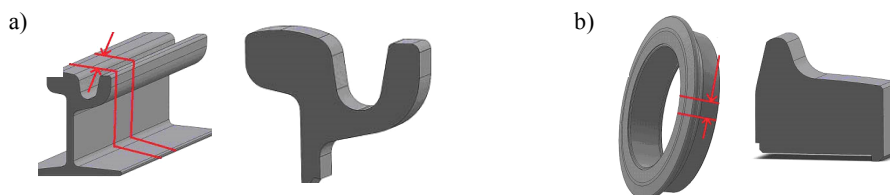
jącego się na przodzie skrajnego członu pojazdu. Badano po dwie obręcze dla każdego pojazdu, zdementowane z tego samego wózka napędowego, z kół będących po tej samej stronie pojazdu, jednak na dwóch różnych osiach (**Rys. 1**).



**Rys. 1. Schematyczne przedstawienie położenia kół z badanymi obręczami w wózku tramwaju wraz z przyjętymi oznaczeniami**

Fig. 1. Schematic representation of the position of the wheel rims studied in a wheelchair tram with the approved indications

Prowadząc badania, należało uzyskać próbki z badanych obiektów. W tym celu wycięto z otrzymanych szyn oraz obręczy tramwajowych stosowne fragmenty. Wygląd próbek do badań po ich wycięciu z dostarczonych elementów przedstawiono na **Rysunku 2**.

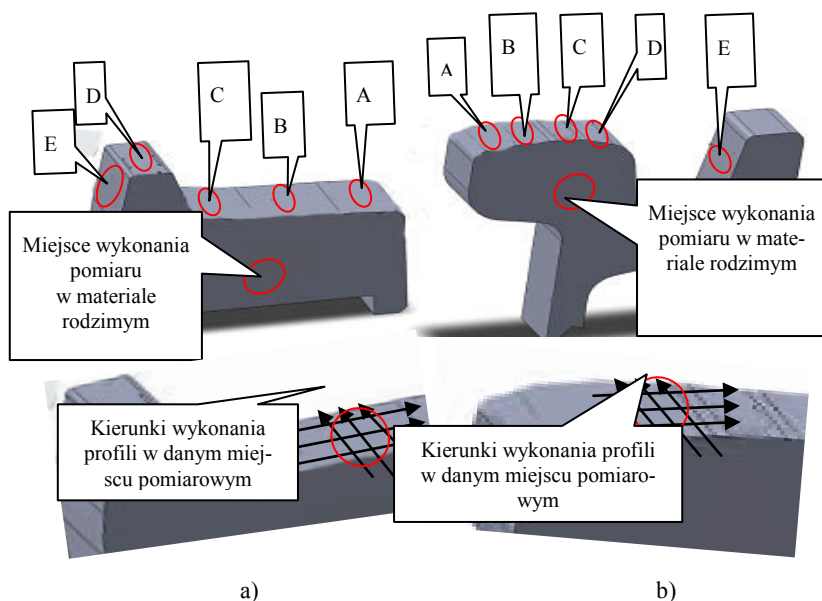


**Rys. 2. Wygląd próbek do badań wyciętych z: a) szyny tramwajowej, b) obręczy tramwajowej**

Fig. 2. Appearance of the test pieces cut from: a) a tram rail, b) of the rim of tram

W kolejnym etapie badań wybrano miejsca przeprowadzenia pomiarów twardości oraz struktury geometrycznej powierzchni (chropowatości) metodą profilową. Pomiary twardości wykonano na powierzchni toczonej, wierzchołku obrzeża i płaszczyźnie czołowej wewnętrznej obręczy. W przypadku szyny wykonano pomiary powierzchni toczonej główki oraz wewnętrznej powierzchni kołnierza rowka szyny. Miejsce położenia obszarów pomiarowych przedstawiono na **Rysunku 3**. Ponadto w przypadku badania twardości wykonano także

pomiary materiału rodzimego obręczy i szyny. W każdym miejscu pomiaru wykonano sześć pomiarów twardości, które następnie uśredniano.



**Rys. 3. Schemat rozmieszczenia miejsc wykonania pomiarów twardości HV 10 oraz profili chropowatości powierzchni dla badanych próbek: a) obręczy (A, B, C – powierzchnia toczna; D – wierzchołek obrzeża; E – płaszczyzna czołowa wewnętrzna), b) szyny (A, B, C, D – powierzchnia toczna główki; E – wewnętrzną powierzchnie kolnierza rowka)**

Fig. 3. Schematic layout of measurements of hardness of HV 10 and the surface roughness profiles for the test samples a) of the rim (A, B, C – running surface D – top of the rim, E – the plane internal face), b) the rail (A, B, C, D – the running surface of the head, E – the inner flange surfaces of the groove)

Pomiary twardości przeprowadzono metodą Vickersa, stosując siłę obciążającą wglębnik równą  $F = 0,980$  N. Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem twardościomierza Zwick 3212. Promienie krzywizn badanych powierzchni, zgodnie z dokumentacją techniczną oraz pomiarami, były tak małe, że pomiar twardości przeprowadzono jak dla powierzchni płaskich. Pozostałe warunki zachowano zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1:2007 dotyczącą pomiarów twardości metodą Vickersa.

Pomiary parametrów struktury geometrycznej powierzchni ( $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_z$ ) przeprowadzono w tych samych miejscach, co pomiary twardości (**Rys. 3**). W każdym z miejsc na próbkach wykonano sześć profilogramów, z czego trzy wykonano w jednym kierunku, a następnie kolejne trzy prostopadłe do wcześniejszych (**Rys. 3**).

Profilogramy wykonano z wykorzystaniem profilometru stykowego firmy ZAISS wyposażonego w głowice z przetwornikiem indukcyjnym i oprogramowaniem SUFORM firmy SAJD METROLOGIA pozwalającym na pomiary i analizę odchyłek prostoliniowości i chropowatości powierzchni (pomiar 2D). Pomiary prowadzono, wykorzystując ramię pomiarowe zakończone diamentową końcówką stykową (bez ślizgacza) w kształcie ostrosłupa o zaokrąglonym wierzchołku. Prędkość przesuwu końcówki pomiarowej wynosiła 0,1 mm/s, a długość odcinka elementarnego  $\lambda_c = 0,8$  mm, długość odcinka pomiarowego  $L_n$  wynosiła 4 mm). Pozostałe warunki przeprowadzenia pomiarów były zgodne z normą PN-EN ISO 4288:1997 Wymagania geometryczne wyrobów – Struktura geometryczna powierzchni – Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni metodą profilową.

Wszystkie badania przeprowadzono z wykorzystaniem urządzeń znajdujących się w Laboratorium Podstaw Trwałości Instytutu Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej.

## WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na podstawie wyników pomiarów twardości HV10 mierzonej w wytypowanych miejscach na powierzchni obręczy oraz w ich materiale rodzimym można wnioskować, że występują wyraźne różnice wartości tego parametru. Zestawienie średniej twardości HV10 mierzonej w określonych miejscach dla poszczególnych próbek przedstawiono w **Tabeli 1**.

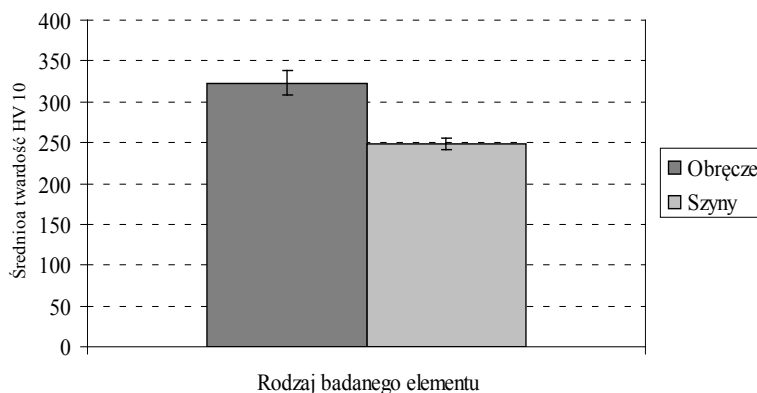
**Tabela 1. Zestawienie średniej twardości HV10 mierzonej na powierzchni oraz w materiale rodzimym poszczególnych obręczy z uwzględnieniem przedziałów ufności na poziomie istotności 0,1**

Table 1. Summary of medium hardness HV10 measured at the surface and the base material of each of the rim, taking into account the confidence intervals at a significance level of 0.1

Nazwa tramwaju	Oznaczenie badanej próbki	Średnia twardość HV10 mierzona na powierzchni badanej próbki	Średnia twardość HV10 mierzona w materiale rodzimym badanej próbki
Solaris Tramino S105P	1-I	417±20	353±11
	1-II	413±16	291±4
Siemens Combino	2-I	383±18	297±4
	2-II	390±13	286±3
Moderus Beta MF 02 AC	3-I	419±17	347±5
	3-II	407±11	341±3
Konstal 105N	4-I	406±13	358±2
	4-II	414±12	337±3
Düewag GT8	5-I	381±15	347±3
	5-II	392±14	268±5

Zestawienie twardości mierzonej w materiale rodzimym szyn ( $249 \pm 14$  HV 10) z twardością mierzoną na powierzchni ( $381 \pm 14$  HV 10) także wskazuje na utwardzenie tych elementów. Większa twardość warstwy wierzchniej badanych elementów w stosunku do twardości materiału rodzimego wskazuje na to, że podczas eksploatacji pojazdów doszło do umocnienia tej warstwy.

Zestawienie średniej twardości mierzonej w materiale rodzimym obręczy oraz szyn (dla wszystkich próbek) pozwala dostrzec, iż występuje 23% różnica (**Rys. 4**).



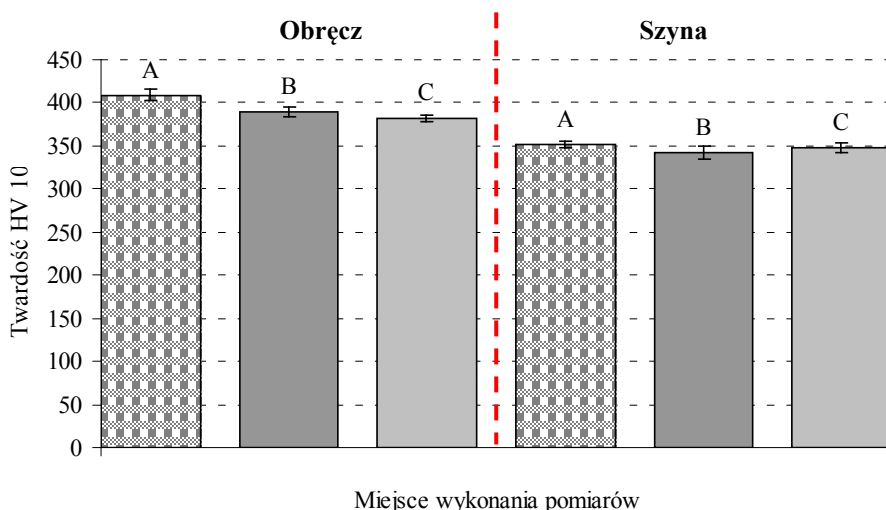
**Rys. 4.** Zestawienie średnich twardości HV 10 dla wszystkich pomiarów wykonanych w materiale rodzimym obręczy oraz szyn z uwzględnieniem przedziałów ufności na poziomie istotności 0,1

**Fig. 4.** A comparison of average hardness HV 10 for all measurements taken in the rim base material and the rails, taking into account the confidence intervals at a significance level of 0.1

Wartość 23% otrzymana w badaniach jest zbliżona do wymogu 20% różnicy twardości obręczy w stosunku do szyn.

Ponieważ w procesie zużywania najbardziej znacząca jest twardość warstwy wierzchniej obręczy oraz szyny, wyniki pomiarów tych miejsc przedstawiono na **Rys. 5**. Zestawienie w **Tabeli 2** wskazuje jednoznacznie, że uwzględniając procesy umacniania przez zgmiot obu elementów pary ciernej, obserwuje się wyższą twardość badanych obręczy niż badanych szyn w wybranych miejscach styku tych elementów w czasie eksploatacji. W zestawieniu brano pod uwagę uśrednioną twardość z miejsc A, B i C wszystkich badanych obręczy i szyn tramwajowych. Okazuje się jednak, że średnie różnice twardości w punktach styku obręczy z szyną zmieniają się w granicach od zaledwie 9% do 14%.

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni pozwoliły zaobserwować, że zmiany parametru Ra zawierają się w przedziale od około 0,5 do 3  $\mu\text{m}$ . Takie wartości Ra można porównać do uzyskiwanych po szlifowaniu elementów stalowych.



**Rys. 5. Zestawienie średnich twardości HV10, mierzonych na powierzchni wszystkich badanych obręczy oraz szyn w obszarach ich styku podczas eksploatacji. Granice przedziałów ufności dla wartości średnich podano na poziomie istotności 0,1**

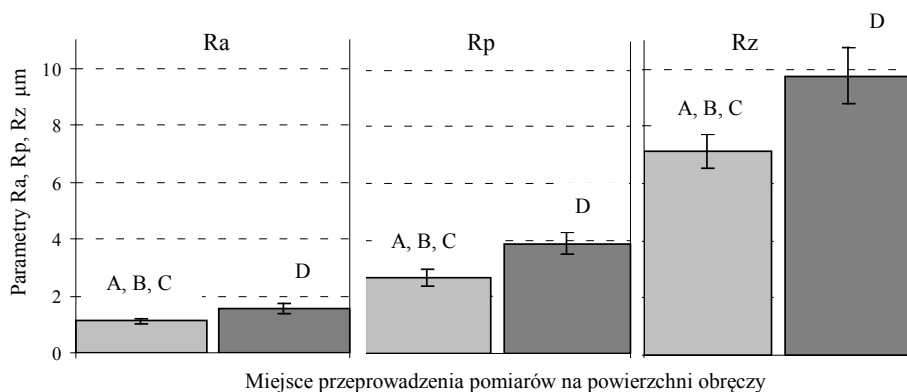
Fig. 5. Statement of medium hardness HV10, measured on the surface of all surveyed the rim and rails in their areas of contact during operation. The limits of confidence intervals for the mean values are given at the significance level of 0.1

**Tabela 2. Zestawienie procentowych różnic twardości badanych szyn oraz obręczy w miejscach ich współpracy w czasie eksploatacji. Granice przedziałów ufności dla wartości średnich podano na poziomie istotności 0,1**

Table 2. Summary of percentage differences in hardness of the tested rails and rim in their co-operation during operation. The limits of confidence intervals for the mean values are given at the significance level of 0.1

Różnica procentowa twardości w miejscu styku obręczy i szyny					
A		B		C	
Twardość obręczy	Twardość szyn	Twardość obręczy	Twardość szyn	Twardość obręczy	Twardość szyn
409±7	352±4	389±6	342±7	382±4	348±5
14%		12%		9%	

Dokonując zestawienia badanych parametrów chropowatości w miejscach obejmujących powierzchnię toczną (miejsca A, B, C) z wierzchołkiem obrzeża (miejsce D) obręczy, zaobserwowano wyraźne różnice dla wszystkich badanych elementów. W każdym przypadku wartości średnie badanych parametrów chropowatości na powierzchni tocznej były mniejsze niż na obrzeżu obręczy. Przykładowe zestawienie tych parametrów dla pojazdu Solaris Tramino S105P przedstawiono na **Rysunku 6**.



**Rys. 6. Zestawienie średnich wartości badanych parametrów chropowatości dla powierzchni tocznej oraz powierzchni obrzeża obręczy pojazdu Solaris Tramino S105P. Granice przedziałów ufności dla wartości średnich podano na poziomie istotności 0,1**

**Fig. 6. A comparison of average values of the studied parameters for the running surface roughness and surface of the rim flange of the vehicle Solaris Tramino S105P. The limits of confidence intervals for the mean values are given at the significance level of 0.1**

Większe wartości parametrów chropowatości obrzeży badanych obręczy wynikają z faktu, iż pojazd w czasie przejazdu przez tak zwane krzyżownice obrzeżem przetacza się po rowku krzyżownicy. Gdy w rowku znajdują się zanieczyszczenia (piasek, woda itp.) i produkty zużycia, następuje proces intensywnego niszczenia warstwy wierzchniej między innymi przez zużywanie ściernie, które zwiększa chropowatość powierzchni obrzeża, co może przyspieszać zużycie tego obszaru obręczy.

W trakcie badań zwrócono uwagę na zróżnicowany sposób osadzania badanych obręczy na kole bosym – mianowicie w pewnych przypadkach występuje wkładka gumowa (Solaris Tramino S105P, Siemens Combino), a w innych jej nie ma (Moderus Beta MF 02 AC, Konstal 105N, Düweg GT8). Pojazdy obu grup różnią się również nieco konstrukcją wózka, która zmieniała się ze względu na różny czas projektowania tych pojazdów. Nie stwierdzono jednak wpływu różnic w konstrukcji wózków oraz sposobu osadzenia obręczy na kołach bosych na badane parametry chropowatości (**Tab. 3**). Zestawienie z **Tabeli 3** pozwala także stwierdzić, że nie występują różnice w chropowatości skrajnych obszarów powierzchni tocznej obręczy badanych grup pojazdów.

Obserwacje wartości parametru Rz w stosunku do parametru Rp wskazują na 2÷3-krotnie większą wartość parametru Rz w tych samych miejscach pomiarowych w stosunku do parametru Rp. Można w związku z powyższym stwierdzić, że powierzchnie obręczy tramwajowych charakteryzują się większym udziałem wgłębień niż wzniesień od linii średniej.



**Tabela 3. Zestawienie badanych parametrów chropowatości w wybranych miejscach na powierzchni tocznej badanych obręczy z podziałem na pojazdy z kołami z i bez wkładki gumowej. Granice przedziałów ufności dla wartości średnich podano na poziomie istotności 0,1**

Table 3. Summary of roughness parameters studied in selected places on the rolling surface of the rim of respondents divided into vehicles with wheels and without the rubber insert. The limits of confidence intervals for the mean values are given at the significance level of 0.1

Badany parametr	Wartość średnia parametru w miejscu „A” na powierzchni tocznej $\mu\text{m}$	Wartość średnia parametru w miejscu „C” na powierzchni tocznej $\mu\text{m}$	Rodzaje pojazdów
Ra	0,90±0,09	1,10±0,08	Moderus Beta MF 02 AC, Konstal 105N, Dü- wag GT8
Rp	2,30±0,20	2,58±0,15	
Rz	6,10±0,39	7,14±0,45	
Ra	0,99±0,18	1,14±0,22	Solaris Tramino S105P, Siemens Combino
Rp	2,28±0,41	2,85±0,47	
Rz	6,16±0,97	7,16±1,10	

**Tabela 4. Wartości badanych parametrów chropowatości powierzchni dla badanych szyn Ri60N w miejscach niepoddanych napawaniu (miejsce „A i B”) oraz w miejscach napawanych (miejsce „C i D”). Granice przedziałów ufności dla wartości średnich podano na poziomie istotności 0,1**

Table 4. The values of surface roughness parameters studied for the test Ri60N rails in places not subject to deposition (location "A and B") and deposited in places (where "C and D"). The limits of the confidence intervals for the mean values are given at a significance level of 0.1

Badany parametr	Wartość średnia parametru w miejscu „A i B” $\mu\text{m}$	Wartość średnia parametru w miejscu „C i D” $\mu\text{m}$
Ra	1,54±0,2	0,42±0,1
Rp	3,47±0,4	1,30±0,3
Rz	9,22±1	3,90±0,5

Pomiary w wytypowanych miejscach na powierzchni badanych dwóch fragmentów szyny Ri60N wykazały wyraźne różnice w chropowatości dwóch miejsc pomiarowych. Miejsca znajdujące się na główce szyny dalej od rowka szyny (miejsce „A i B” (**Rys. 3**)) charakteryzowały się wyższymi wartościami badanych parametrów w stosunku do pozostałych badanych miejsc na główce szyny (**Tab. 4**).

Pozostałe miejsca na główce szyny obejmowały obszary zlokalizowane najbliżej rowka szyny (miejsce „C i D”) i miały znacznie mniejsze wartości analizowanych parametrów. Przyczyną takiej sytuacji było to, iż w miejscach pomiarowych C i D znajduje się napoina. Napoina stanowiąca obszar materiału o podwyższonej twardości (badania wykazały  $608 \pm 27$  HV10) w czasie eksploatacji na powierzchni główki szyny pozwala na utrzymanie powierzchni o mniejszej chropowatości w stosunku do pozostałej powierzchni główki szyny.

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły sformułować następujące wnioski i spostrzeżenia:

- procesy zachodzące w czasie eksploatacji badanych szyn oraz obręczy tramwajowych powodują umocnienie warstwy wierzchniej oraz zmiany chropowatości w jej obrębie,
- średnia twardość badanych obręczy jest większa o 23% od średniej twardości szyny tramwajowych w miejscu materiału rodzimego,
- średnie różnice twardości między obręczą (powierzchnia toczna) i szyną (powierzchnia główki) w obszarach, które stykają się w czasie eksploatacji mogą zmieniać się w granicach od 9% do 14%,
- proces eksploatacji badanych obręczy wywołuje wzrost chropowatości powierzchni obrzeża w stosunku do chropowatości powierzchni tocznej,
- nie zaobserwowano zmian wartości badanych parametrów struktury geometrycznej powierzchni obręczy dla pojazdów wyposażonych w koła z lub bez wkładki gumowej,
- na powierzchni główki szyny występują znaczne różnice badanych parametrów struktury geometrycznej powierzchni obszaru napawanego w stosunku do obszaru bez napawania.

*Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego „Identyfikacja i modelowanie zjawisk nieliniowych w strefie kontaktu koła z szyną celem opracowania nowego profilu koła tramwajowego” (LIDER/20/521/L-4/12/NCBR/2013 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER.*

## LITERATURA

1. Kwaśnikowski J., Małdziński L., Borowski J., Firlik B., Gramza G.: Analiza przyczyn przyspieszonego zużycia powierzchni tocznych kół autobusu szynowego SA 108 (215M), Pojazdy Szynowe 2007, nr 2, s. 1–13.
2. Norma PN-91 K-88251: 1991, Zestawy kołowe taboru tramwajowego. Kontur bieżni kół elastycznych wagonów tramwajowych.
3. Norma PN-K-92012: 1997, Tabor tramwajowy. Zestawy kołowe.

4. Piec P.: Analiza zjawisk kontaktowych w elementach pojazdów szynowych. Biblioteka Problemów Eksploatacji ITeE, Radom 1999.
5. Warunki techniczne wykonania i odbioru szyn kolejowych. Nr WTWiO-ILK3-5181-2/2004E.P.
6. Zając G., Jurga S., Badania trwałości obręczy kół tramwajowych eksploatowanych w MPK S.A. w Krakowie, Problemy Eksploatacji 2009, nr 2, s. 139–14.

### Summary

**The paper presents the results of research on the hardness and surface geometric structure of selected surfaces of the wheels and rails of a tram system. Vehicles whose rims were examined belonged to the Municipal Transport Company in Poznan Ltd. The study showed the impact of the exploitation process on the strength of the surface layer of the rim and the tested rails and of running surface roughness changes with respect to the top of the rim during operation.**