

Józef DĄBROWSKI
Przemysław SZOSTAK
Ryszard SZYSZKO

ELEKTROCHEMICZNE ZUŻYCIE SZYN W TOROWISKACH TRAMWAJOWYCH

STRESZCZENIE *Mechaniczne zużycie szyn jest zjawiskiem znanym i opisywanym w literaturze, a także widocznym w torowisku dla postronnego obserwatora. Zelektryfikowanie prądem stałym transportu szynowego wywołuje w torowisku dodatkowe zagrożenia w stosunku do szyn. W literaturze technicznej istnieje wiele pozycji dotyczących oddziaływania prądów błędzących na podziemną metalową infrastrukturę oraz sposobom ochrony tych konstrukcji. W niniejszym artykule zwrócono uwagę na fakt, że prądy błędzące przyczyniają się również do zużycia – zmiany geometrii szyn – w miejscach innych niż główka szyny. Podano przykłady takiego zużycia oraz warunki jakie muszą wystąpić, aby skutki zjawiska prądów błędzących mogły się uwidocznić.*

Słowa kluczowe: prądy błędzące, torowiska
DOI: 10.5604/01.3001.0012.1255

1. WSTĘP

Budowa klasycznych torowisk kolejowych i tramwajowych w zasadzie jest zbliżona. Z reguły są to linie dwutorowe – po jednym torze dla danego kierunku jazdy. Podstawowe składniki toru to: posypka tłuczniowa na podbudowie, a w niej zagłębione podkłady, do których przytwierdzone są szyny. Względny mechaniczny, tj. dopuszczalny nacisk osi na szynę, decydują o grubości warstwy podsypki tłuczniowej.

Współczesne torowiska budowane są na podkładach betonowych (strunobetonowych lub żelbetonowych), konstrukcyjnie przystosowanych i dedykowanych do torowiska kolejowego lub tramwajowego. Wcześniej, dla obu rodzajów torowisk najczęściej stosowano podkłady drewniane.

mgr inż. Józef DĄBROWSKI, mgr inż. Przemysław SZOSTAK, inż. Ryszard SZYSZKO
e-mail: [j.dabrowski; p.szostak; r.szyszko]@iel.waw.pl

Instytut Elektrotechniki, Zakład Trakcji Elektrycznej,
ul. M. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa



Rys. 1. Przykład klasycznego torowiska tramwajowego budowy otwartej, wydzielonego między jezdniami z wąskimi pasami zieleni na zewnątrz torów; szyny typu kolejowego posadowione są na podkładach drewnianych z przytwierdzeniem podkładkami K1 na wkręty do podkładu i łapkami do stopki szyn na śruby

W Polsce preferowane jest sprężyste przytwierdzenie szyn typu SB, niezależnie od przeznaczenia podkładu. W przypadku torowisk tramwajowych stosowane są zarówno szyny kolejowe, jak i rowkowe zwane tramwajowymi. Te ostatnie nie są montowane w torowiskach kolejowych. Następną istotną różnicą między torowiskami kolejowymi i tramwajowymi jest to, że tory kolejowe w znaczącej większości są budowy otwartej – widoczna na powierzchni jest cała szyna od stopki po główkę wraz elementami przytwierdzenia stopki do podkładu. W torowiskach tramwajowych nawet wydzielone tory mają budowę nie do końca zdefiniowaną w normie [1]. Torowisko budowy zamkniętej oznacza, że widoczna jest jedynie część jezdni główki szyny. Takie rozwiązania znajdują się na przejazdach przez torowiska, zarówno kolejowe jak i tramwajowe. Na rysunkach 1 i 2 pokazano przykładowe rozwiązania klasycznego torowiska tramwajowego, tak jak to

widać z pozycji pasażera tramwaju. W najczęściej spotykanych rozwiązaniach torowisk tramwajowych pas torowiska jest wydzielony krawężnikiem, który graniczy bezpośrednio z jezdnią lub pasem zieleni, za którymi znajduje się jezdnia lub chodnik dla pieszych. Tłuczeń w torowiskach tramwajowych sypany jest ręcznie, w przeciwieństwie do torowisk kolejowych, gdzie warunki umożliwiają zastosowanie sprzętu zmechanizowanego [2]. Mechanizacja prac związanych z budową torowiska wpływa na równomierne, zawsze poniżej stopki szyn, rozsypania podsypki w torowym ruszcie kolejowym. Brak miejsca, w przypadku prac torowych w pasie drogowym, wymusza magazynowanie nadwyżek tłucznia na zbudowanym już fragmencie torowiska. W następnym etapie dokonywane jest przenoszenie tejże nadwyżki w miejsce kolejnego nowego odcinka. To sprzyja lokalnym nadsypaniom tłucznia powyżej stopki szyny oraz wstępnemu zabrudzeniu miejsc kotwienia szyn do podkładu.



Rys. 2. Przykład klasycznego torowiska tramwajowego w strefie przystankowej; widoczne są między szynami wycieki smaru z przekładni starszych typów tramwajów, u góry krawężnik wysepki dla pasażerów; na szynach naniesione są znaki informacyjne – miejsca rozcięcia szyn do demontażu rusztu torowego (numeracja odcinków szyn i miejsce wyznaczenia profilu główek szyn w torze przed jego demontażem)

Dodatkowo, ze względu na ograniczanie emisji hałasu wywołwanego przez przemieszczający się tabor, stosuje się zasypywanie przestrzeni pomiędzy zewnętrzną szyną a krawężnikiem do wysokości pod główkę szyny. Niekiedy tłuczeń sięga do główki szyny nawet w przestrzeni międzyszynowej, szczególnie w torze przy krawędzi przystanku. Zdarza się, że przestrzeń międzytorowa nie jest zasypała powyżej stopki szyny.

2. UKŁAD ZASILANIA TOROWISKA

Torowiska tramwajowe, niemal na całej swojej długości, są zelektryfikowane napięciem prądu stałego. W polskich systemach tramwajowych stosowane jest napięcie znamionowe 600 V DC, nawet w przypadku nowo wybudowanej w 2016 r. linii w Olsztynie. Należy nadmienić, że norma na znamionowe napięcia trakcyjne [3] z 1999 r. podawała wartość 600 V DC jako wycofywaną z systemów trakcyjnych, a w jej miejsce zalecano napięcie 750 V, dla nowych systemów trakcyjnych. W ostatnim wydaniu z 2006 r. napięcie 600 V już nie figuruje w zapisie normie [3]. To znamionowe napięcie występuje pomiędzy przewodem jezdnym wiszącym nad torowiskiem, a szynami, zaś dopuszczalne wartości chwilowe i czas ich trwania podano w normie [3].

2.1. Sieć jezdna, górna, zasilająca

Zasilanie współczesnych sieci tramwajowych oparte jest na podstacjach trakcyjnych przetwarzających za pomocą zespołów prostownikowych (prostownik z transformatorem dopasującym) energię elektryczną systemu przemysłowego prądu przemiennego 50 Hz na prąd stały. Klasycznie, podstacja tramwajowa zasilą pewien określony obszar, na którym izolatorami sekcyjnymi zostały wydzielone odcinki sieci górnej zasilane jednostronnie. Każdy z takich odcinków w podstacji tramwajowej ma własne pole w rozdzielni prądu stałego oraz kabel zasilający łączący ten odcinek z polem w podstacji. Liczba pól rozdzielni prądu stałego w podstacji tramwajowej związana jest z wielkością obszaru zasilania. Konieczność zapewnienia niezawodnego zasilania sieci powoduje, że w budowie rozdzielnic prądu stałego stosowana jest szyna obejściowa, a w sieci rozwieszanej nad torami, np. na słupach znajdują się odłączniki umożliwiające zmiany w konfiguracji układu zasilania, zarówno w obszarze danej podstacji, jak i na stykach sąsiednich. W przypadku przełączeń odłączników na stykach obszarów zasilania podstacji następują zmiany w obszarach zasilania obu sąsiadujących podstacji. Każde przełączenie w układzie sieci zasilającej traktuje się jako stan awaryjny, czyli o ograniczonym czasie pracy, do chwili usunięcia przyczyny dokonania zmiany w układzie. W ostatnim czasie na forum Komisji Zasilania Izby Gospodarczej Komunikacji Miejskiej przyjęto jako preferowany dla polskich sieci tramwajowych układ dwustronnego zasilania [4–6]. Prezentowane w Komisjach Zasilania IGKM rozwiązania nie we wszystkich przypadkach spełniają warunki sieci dwustronnie zasilanej, jak np. pewność zasilania sieci trakcyjnej przy zaniku zasilania podstacji z przemysłowego systemu elektro-energetycznego. Proponowane układy zasilania rozpatrywane były od strony sieci górnej i pól rozdzielni prądu stałego w podstacji. Niestety w rozważaniach pominięto sieć powrotną traktując ją jak sieć górną. Brak sekcjonowania w torowisku powoduje, że rozprędy prądów trakcyjnych w sieci powrotnej, w niektórych przypadkach, pomimo zmian w sieci górnej, nie ulegają zmianie, a jedynie zmniejszeniu co do wartości wypadkowej. Zaproponowanie dwustronnego zasilania w przypadku klasycznych dwóch podstacji tramwajowych z wielopolowymi rozdzielnicami prądu stałego,

zwłaszcza przy eksploatacji taboru z rekuperacją do sieci, spowoduje istotne zmiany w rozpywach prądu w tak rozbudowanym układzie. Zwiększony obszar zasilania od strony sieci górnej – zwarcie izolatora sekcyjnego na styku tych obszarów – przy stałym rozkładzie jazdy tych samych typów pojazdów, spowoduje, w zakresie pracy sieci powrotnej, wzrosty chwilowych wartości spadków napięcia i wywoływanych tym faktem konsekwencji dla otoczenia – zwłaszcza w odniesieniu do podziemnych konstrukcji metalowych [7].

2.2. Sieć powrotna

Torowisko jest podstawowym elementem składowym sieci powrotnej, umożliwiającej powrót (przepływ) prądu do podstacji trakcyjnej. W przeciwieństwie do przewodów jezdnych, torowisko tramwajowe nie jest sekcjonowane na całej długości sieci tramwajowej miasta, czyli z punktu widzenia torowiska nie ma fizycznie wydzielonych obszarów zasilania. Natomiast na podstawowym obszarze zasilania podstacji występują przyłącza kabli powrotnych danej podstacji. W torowisku lub tuż obok zabudowane są szafki kabli powrotnych. Do tych szafek doprowadzane są kable od każdej z szyn jezdnych i przyłączane do zbiorczej szyny (płaskownika). Od tego płaskownika odchodzą kable (rzadko jest to pojedynczy kabel), które są przyłączane poprzez odłączniki na wspólną szynę kabli powrotnych w podstacji trakcyjnej. Jest regułą, że liczba kabli powrotnych przypadających na obszar zasilania podstacji jest mniejsza niż kabli zasilających, a to z uwagi, na większe spadki napięcia w przewodzie jezdnym niż w szynach. Różnice w spadkach napięcia wynikają z rezystancji przewodów jezdnych oraz szyn torowiska przewodzących prąd trakcyjny.

Warunki użytkowania i dostępności elementów sieci powrotnej, szczególnie dla osób postronnych, powodują, że istotne stają się względy bezpieczeństwa związane z porażeniem elektrycznym tych osób, jak i pasażerów korzystających z tramwaju. Oznacza to konieczność zapewnienia napięć dotykowych o bezpiecznych wartościach napięcia rażenia, we wszystkich występujących stanach pracy systemu zasilania prądu stałego [8]. Ponieważ istnieje prawdopodobieństwo uszkodzenia izolacji zawieszonych nad torami przewodów jezdnych, to słupy trakcyjne stojące między torami lub w odległości kilku metrów od zewnętrznych szyn torowiska są uszyniane, tzn. konstrukcja słupa jest metalicznie połączona z szyną torowiska. W najnowszych sieciach tramwajowych uszyniane są jedynie słupy z aparaturą łączeniową, zaś zawieszenie przewodów jezdnych realizowane jest w układzie podwójnej izolacji. Zerwany przewód jezdny sieci zasilającej może spaść na szyny, powodując zwarcie w sieci, które zostanie wyłączone przez odpowiednie zabezpieczenia przeciwzwarceniowe. Zwarcie takie powoduje również podniesienie napięcia pomiędzy ziemią a szynami. Opadnięcie przewodu jezdnego obok szyn powoduje największy z możliwych wzrost napięcia szyny-ziemia, które powinno uruchomić zabezpieczenie ziemnozwarciowe w podstacji, także (nawet) w przypadku największej odległości od podstacji w jej obszarze zasilania. W przeszłości stosowano w tym celu iskrowniki, a obecnie elektroniczne zabezpieczenie ziemno-zwarceniowe (EZZ). Elementy te kontrolują napięcie pomiędzy uziomem podstacji, a szyną kabli powrotnych. Ochrona przeciwprzepięciowa, zwłaszcza od wyładowań atmosferycznych, jest osobnym zagadnieniem.

Obliczenia projektowe sieci zasilającej prowadzone są przy określonych założeniach w celu przyjęcia mocy podstacji do założonego rodzaju taboru, np. tramwajowego i maksymalnej gęstości jego ruchu w obszarze zasilania tej podstacji, a następnie dobiera się przekroje szyn (płaskowników), kabli w podstacji oraz kabli łączących podstacje z odcinkami sieci górnej i powrotnej. Na zakończenie sprawdzane są oczekiwane spadki napięć w sieciach, dotyczy to zwłaszcza sieci powrotnej.

3. EKSPLOATOWANY TABOR I ROZKŁADY JAZDY

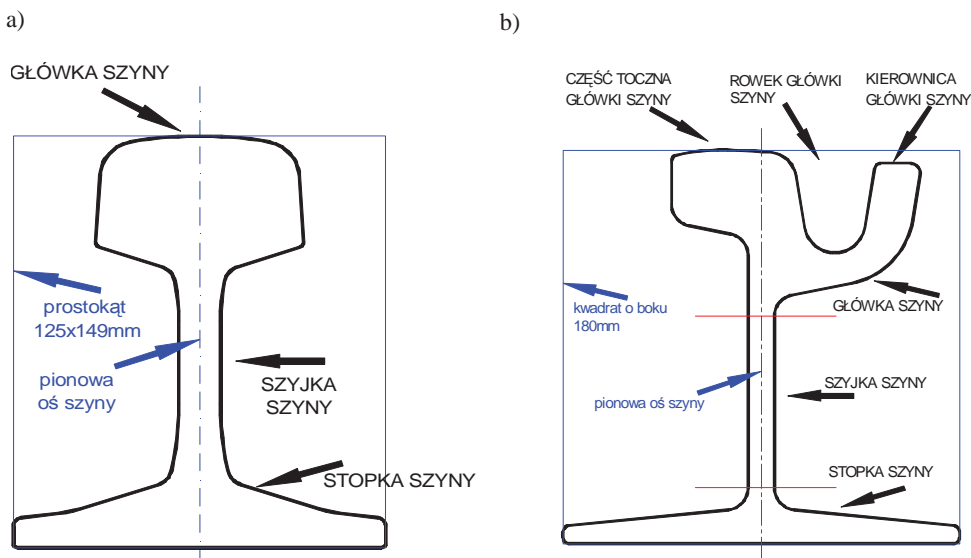
Zgodnie z definicją, tramwaj jest to pojazd o nacisku na oś do 10 ton. Jeżeli masa pojazdu jest większa niż liczba osi napędowych na wózkach pomnożona przez dopuszczalny nacisk, to w takich pojazdach stosuje się dodatkowe wózki toczne. Z punktu widzenia oddziaływania pojazdu na szyny znaczenie mają jeszcze takie parametry jak: średnice kół, rozstaw osi w wózkach, skrętność wózka i odsprężynowanie pojazdu. Obecnie w Polsce w aglomeracjach i miastach z komunikacją tramwajową eksploatowany jest tabor z napędem od klasycznego oporowego poprzez układy czoperowe (z silnikami prądu stałego) po napędy falownikowe z silnikami asynchronicznymi [9–11]. Generalnie klasyczny oporowy tramwaj w czasie trwania rozruchu pobiera z sieci prąd zależnie od stopnia załączenia opornika rozruchowego, przy czym każde przełączenie stopnia wywołuje pobór prądu zbliżony do znamionowego. Dynamika przełączania kolejnych stopni zależy od rozwiązania technicznego zadawania prędkości pojazdu.

Każdy typ pojazdu charakteryzuje się własnymi parametrami, z których dla obciążeń elektrycznych sieci istotna jest moc pobierana na cele trakcyjne i na cele potrzeb własnych danego pojazdu, co przy założonej stałej wartości napięcia zasilania jest równoważne pobieranemu prądowi.

Projektowanie sieci dla klasycznego taboru jest stosunkowo proste, gdyż prąd pojazdu (trakcyjny i potrzeb własnych) jedynie dopływa z podstacji do pojazdu. Jednokierunkowy przepływ prądu we wszystkich elementach sieci trakcyjnej doprowadził do nazewnictwa szeregu elementów w tej sieci, jak np. kabel zasilający, kabel powrotny, a pole z wyłącznikiem lub wychodzący z niego kabel „zasilaczem”. Stały kierunek przepływu prądu w sieci trakcyjnej pozwalał na stosowanie zalecanego normą [13] kryterium średniorocznego (dobowego, miesięcznego lub kwartalnego) spadku napięcia w szynach przy planowanym ruchu określonego taboru. Opanowanie techniki elektrodynamicznego hamowania napędem trakcyjnym umożliwiło pojawienie się hamowania z rekuperacją – odzyskiem energii kinetycznej pojazdu i przekazaniem do sieci trakcyjnej, a obecnie także do zasobników energii. Rekuperacja do sieci zaburza przyjęte nazewnictwo, ponieważ energia zmienia kierunek przepływu. Przy nie zmienionej polaryzacji sieci trakcyjnej zmiana kierunku przepływu energii oznacza zmianę kierunku przepływu prądu rekuperacji w sieci trakcyjnej. O wpływie rekuperacji na prądy błądzące z trakcyjnych sieci prądu stałego i skutkach dla podziemnych metalowych konstrukcji pisano w [13, 14]. Projektowanie sieci trakcyjnej dla współczesnego taboru z rekuperacją wymaga stosowania symulacji komputerowych obciążenia projektowanych obwodów z uwzględnieniem przewidywanego ruchu pojazdów. W aktualnie eksploatowanych torowiskach tramwajowych obserwuje się coraz większy udział taboru z napędem asynchronicznym, co ma wpływ na rozkład przepływu prądu w sieciach powrotnych.

4. KONSTRUKCJA SZYNY I MIEJSCA JEJ NARAŻENIA

Konstrukcyjnie szynę – jej przekrój poprzeczny – można podzielić na trzy obszary: główkę, szyjkę i stopkę (rys. 3). W przypadku szyny tramwajowej kształt główki szyny jest na tyle rozbudowany, że jest on podzielony na trzy elementy: część toczna główki szyny, rowek oraz kierownica główki szyny. Kierownica bywa w praktyce także nazywana prowadnicą. W eksploatacji systemów tramwajowych występuje też szyna blokowa, w której główka jest spójna ze stopką i nie można wyróżnić szyjki, ale ten typ szyny stosowany jest wyłącznie w torowiskach budowy zamkniętej i w tym artykule nie jest przedmiotem zainteresowania.



Rys. 3. Przekroje poprzeczne szyn spotykanych w torowiskach tramwajowych oraz określenia ich poszczególnych fragmentów wraz z prostokątnym lub kwadratowym obrysem jaki zajmuje nominalnie nowa szyna; a) szyna kolejowa; b) szyna rowkowa zwana także szyną tramwajową

Temu prostemu podziałowi przypisuje się kilkanaście różnych przekrojów szyn dopuszczonych normą [15] obowiązującą od 2006 r.

Ograniczony dopuszczalny nacisk kół tramwajów na szyny powoduje, że w torowiskach tramwajowych spotyka się szyny kolejowe typu S49 oraz rowkowe typu 60R2. Wcześniej w Polsce stosowano szyny rowkowe typu 180 lub typu TB oraz szynę kolejową S42 [16]. Właśnie na takie szyny można natrafić podczas demontażu starego torowiska. Na rysunkach 4-5 pokazano za [15] przekrój poprzeczny popularnych szyn tramwajowych wraz z ich wymiarami. Na tych rysunkach zwrócono uwagę na niewielkie różnice występujące w profilach główki każdej z tych szyn. Rozbieżności te wynikają z porównania kształtów zamieszczonych w normie z kształtami wyrysowa-

nymi w programie ZWCAD, przy wykorzystaniu wymiarów podanych w normie [15]. W tabeli 1 zestawiono wartości przekroju poprzecznego obu typów szyn podane w normie [15] oraz obliczone przez program ZWCAD, dla wyrysowanych tym programem przekrojów. W zależności od tego, który z przekrojów dla danego typu szyny zostanie przyjęty za wzorcowy, należy oczekiwać innego obliczonego mechanicznego zużycia w części główki szyny.

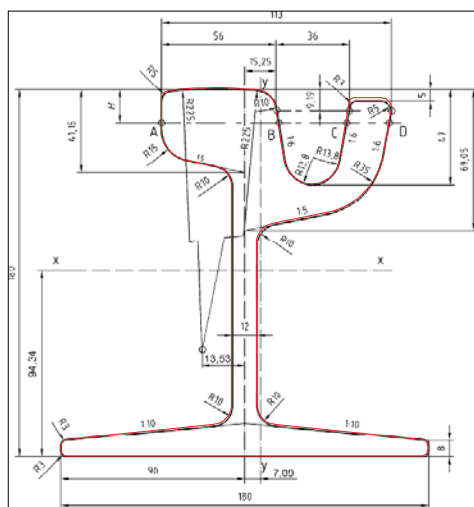
Przy wykonaniu oceny zużycia (ubytków) materiału szyn w częściach stopki i szyki szyny, pozytywnym zjawiskiem jest brak różnic w powierzchniach poprzecznych tych części szyn. Szerokości stopek szyn kolejowych i tramwajowych różnią się w sposób znaczący. Powierzchnia podstawy stopki szyny typu tramwajowego jest zawsze większa od stopki szyny kolejowej.

TABELA 1

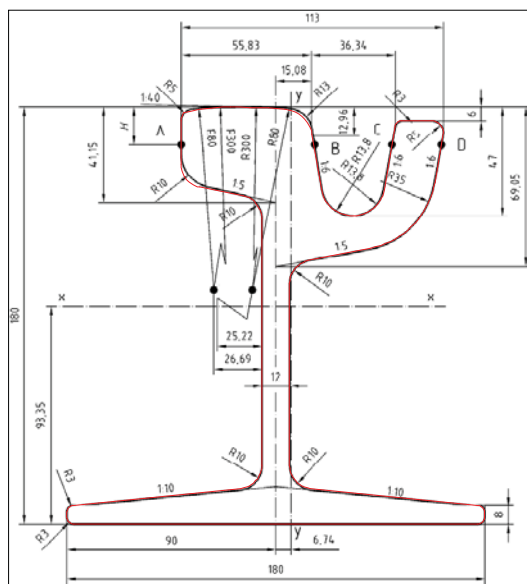
Pole poprzecznego przekroju szyn 60R1 i 60R2 wg danych z normy [15] i danych uzyskanych po narysowaniu w programie typu CAD

Lp.	Typ szyny	Przekrój podany w normie [cm ²]	Przekrój policzony przez komputer [cm ²]	Różnica [%]
1.	60R1	77,19	77,12	+0,09
2.	60R2	76,11	77,02	-1,18

Podobne rozbieżności w geometrii szyn napotyka się przy analizie szyn typu S42 i S49 oraz typu 180, czy TB. Generalnie różnice występują w detalach zaokrągłeń w obszarze główki szyn, co widać na rysunkach 4 i 5. Biorąc pod uwagę technologię produkcji, należy liczyć się jeszcze z tolerancją wykonawczą szyn, które ostatecznie zostają zamontowane w torowisku.



Rys. 4. Porównanie przekroju poprzecznego szyny tramwajowej typu 60R1 wyrysowanej programem ZWCAD zgodnie z podanymi wymiarami – kolor czerwony, ze skanem z normy [15] – kolor czarny; najistotniejsza różnica występuje w wymiarach kierownicy



Rys. 5. Porównanie przekroju poprzecznego szyny tramwajowej typu 60R2 wyrysowanej programem ZWCAD zgodnie z podanymi wymiarami – kolor czerwony, ze skanem z normy [15] – kolor czarny

Cechą charakterystyczną każdej szyny jest jej jednostkowa masa – ciężar przypadający na 1 m bieżący danego typu szyny. Generalnie masa szyn wynika z powierzchni poprzecznego przekroju. Z analizy parametrów podanych w normie [15], a dotyczących powierzchni przekroju poprzecznego i ciężaru 1 mb nowej szyny wynika, że masa właściwa stali stosowanej na szyny wynosi $7,86 \text{ g/cm}^3$.

Wartość ta została przyjęta do dalszych analiz, mając świadomość, że w literaturze przedmiotu występują inne wartości masy właściwej stali stosowanej na szyny. Różnice te zawierają się w przedziale $\pm 0,25\%$.

Dane techniczne dla pozostałych szyn, które można napotkać w demontowanych po kilkunastoletniej eksploatacji w polskich torowiskach tramwajowych, co do profilu przekroju nie są zawsze tak precyzyjne jak w normie – patrz [16]. Praktycznie są znaczne trudności z dotarciem do precyzyjnego opisu profilu chyba, że jest się posiadaczem katalogu producenta szyn, np. [17], ale nawet w tym przypadku pojawiają się istotne problemy z ustaleniem wzorca odniesienia.

Wszystkie strefy przekroju szyn, pokazane na rysunku 3, są narażone na różnego rodzaju naprężenia mechaniczne, w efekcie bezpośredniego oddziaływania na styku główki szyny z obręczami kół pojazdu i przeniesionego na stopkę szyny. Nacisk i tarcie koła o główkę powoduje jej zużycie, zwłaszcza od góry, jak i jednej z jej powierzchni bocznych. Powierzchnie boczne główki i szyjki oraz stopki szyny są poddawane oddziaływaniom atmosferycznym, gdy szyny znajdują się w torowisku budowy otwartej. W przypadku torowiska budowy zamkniętej powierzchnie boczne główki, szyjki oraz całej stopki mogą być poddane oddziaływaniom glebowego elektrolitu. W torowisku

tramwajowym, jeżeli na stopce szyny znajduje się tłuczeń, dolne strefy szyn również mogą być poddawane oddziaływaniom elektrolitu glebowego, zwłaszcza w czasie występowania opadów atmosferycznych. Tłuczeń dotykający do stopki szyny od spodu pomiędzy podkładami przyczyni się z czasem do degradacji tej powierzchni szyny. Powstawanie elektrolitu glebowego w klasycznym torowisku wiąże się z opadami atmosferycznymi typu mgła, mżawka i każdy rodzaj deszczu, a także ze zjawiskiem punktu rosy. Względy trwałości mechanicznej powodują, że konstrukcyjnie torowiska są odwadniane – ich konstrukcja nie dopuszcza do tworzenia zastoin wodnych. Ujemne temperatury powietrza powodują spadki temperatury gruntu – wierzchnich warstw gleby, w tym także i tłucznia. W przypadkach, gdy w gruncie występują temperatury ujemne, ruchliwość jonów elektrolitu glebowego maleje do tego stopnia, że zjawiska przewodzenia prądu w elektrolicie, jak i jego przepływ na styku metal cieciz istotnie zanikają. Wiatr oraz ruch pojazdów przyczyniają się z czasem do wypełniania kurzem przestrzeni powietrznych pomiędzy kamiennymi odłamkami tworzącymi tłuczeń. Dopełnieniem kurzu zawierającego drobiny mineralne, jak i roślinne lub zwierzęce są drobiny żelaza pochodzące z materiału kół, szyn i klocków hamulcowych. Powszechnie uważa się, że materiał szyn ulega korozji rozumianej jako zmiana kształtu powierzchni metalu. Natura pracy sieci powrotnej – o czym poniżej – powoduje odmienne oddziaływanie elektrolitu glebowego na szyny, przy czym zabrudzenie tłucznia przyczynia się do zwiększonego oddziaływania podobnie jak wilgoć przy dodatnich temperaturach powietrza.

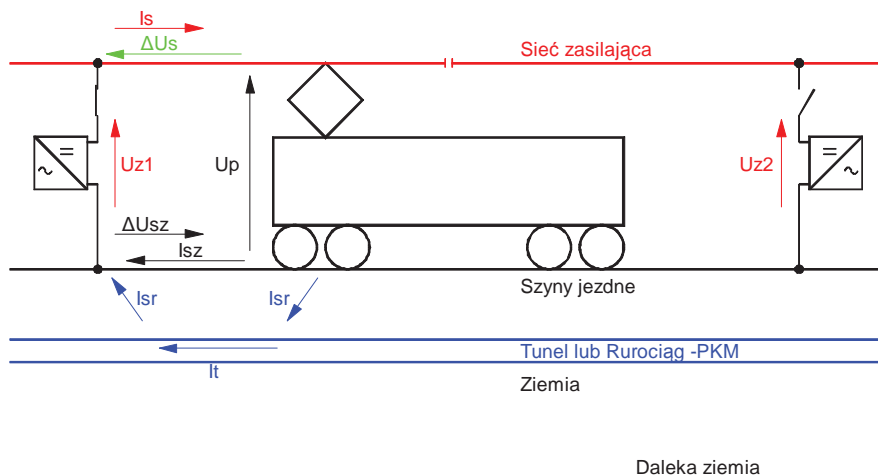
5. STREFOWE POLARYZACJE SZYN W SIECI POWROTNEJ

W przypadku torowiska transportu szynowego, zelektryfikowanego prądem stałym, istotnym staje się rodzaj taboru, który kursuje po szynach. Klasyczny tabor z rozruchem oporowym (zgodnie z rozdz. 3 tego artykułu) powoduje przepływ energii elektrycznej w systemie trakcyjnym tylko w jednym kierunku od podstacji do pojazdu (rys. 6). Sekcjonowanie sieci górnej zapewnia selektywność zabezpieczeń oraz ogranicza spadki napięcia ΔU_s w przewodach sieci pomiędzy podstacją trakcyjną, a odbierakiem pojazdu. W przypadku sieci zasilającej izolację gołego przewodu jezdnego względem ziemi stanowią elementy jego zawieszenia oraz powietrze. W sieci powrotnej nie występuje sekcjonowanie i dla każdego wydzielonego systemu trakcyjnego stanowi ciąg metalicznych przewodów – szyn, z rozjazdami i krzyżownicami stanowiącymi naturalne elementy ekwipotencjalizujące obie szyny w torowisku. W sieciach tramwajowych, zgodnie z zaleceniem normy [12], występują łączniki międzyszynowe oraz międzytorowe, których zadaniem jest wzmacnianie sieci powrotnej, czyli zmniejszanie jej wypadkowej rezystancji. Izolację szyn zapewniają punkty podparcia w torowisku budowy otwartej, zaś w budowie zamkniętej torowiska otuliny nakładane w celu wytlumienia drgań mechanicznych przenoszonych do otaczającej ziemi (gruntu).

Spadek napięcia w szynach ΔU_{sz} z uwzględnieniem istnienia kabli powrotnych pomiędzy szynami a podstacją jest przyczyną wymiany prądu pomiędzy szynami a otaczającą ziemią (gruntem), tj. elektrolitem glebowym. W ogólnym przypadku przy dodatniej polaryzacji sieci górnej w okolicach przyłączy kabli powrotnych prąd upływu z szyn wraca do sieci powrotnej. Na rysunku 6 pokazany jest chwilowy stan rozkładu

napięć oraz prądów w sieci trakcyjnej. Gdy pojazd trakcyjny przemieszcza się po torach pomiędzy podstacjami, to w tym czasie prąd pobierany z podstacji zmienia się w takt prowadzonej jazdy (ruchu), tj. jej trzech faz ruchu:

- rozruchu czyli przyspieszania, wtedy z sieci pobierany jest prąd potrzeb własnych i trakcyjny,
- wybiegu, czyli jazda z rozpędu, hamowanie pojazdu powodowane jest przez opory ruchu, zaś pobór prądu z sieci trakcyjnej dotyczy potrzeb własnych, a przy napędzie asynchronicznym występuje w tym prądzie ewentualnie prąd podtrzymania biegu jałowego (utożsamiany z prądem magnesowania silników);
- hamowania klasycznego (ciernego i oporowego), to z sieci trakcyjnej pobierany jest prąd potrzeb własnych, zaś współcześnie przy hamowaniu z rekuperacją występuje zwrot energii kinetycznej pojazdu do sieci lub zasobnika, a zatem prąd pochodzący z hamowania elektrodynamicznego oddawany jest do sieci.



Rys. 6. Ilustracja mechanizmu powstawania prądów upływu z szyn (sieci powrotnej) zwanego prądem błędzącym

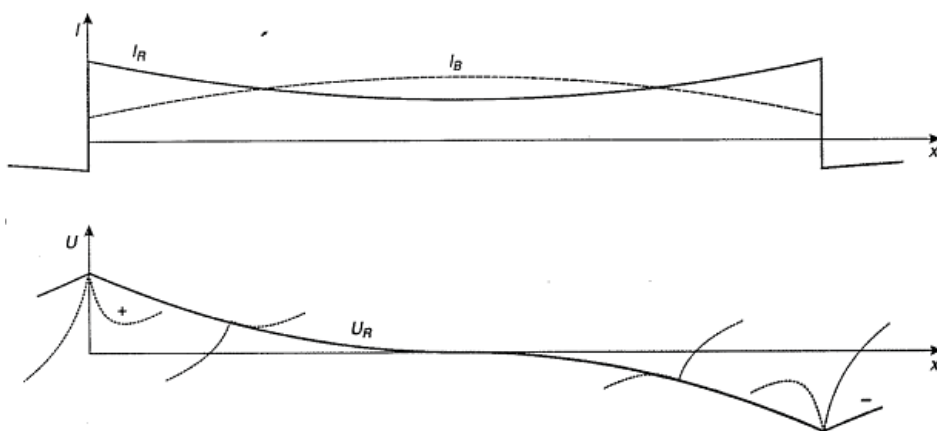
Powoduje to występowanie odcinków torowiska (sieci powrotnej), na których występują, zależnie od jeżdżącego po nim taboru, tylko powrót prądu trakcyjnego i potrzeb własnych do podstacji oraz coraz częściej także odcinków z poborem prądu z podstacji.

Analiza sieci powrotnej dla klasycznego taboru z rozruchem oporowym lub impulsowym, ale bez zwrotu energii kinetycznej hamowania pojazdu do sieci trakcyjnej, sprowadzana była do wartości średnich za określony czas, np. doby, tygodnia, miesiąca, czy też roku, reprezentowanych okładem prądowym na odcinku zasilania.

Z rozważań tych jednoznacznie wynika, że część prądu w szynach zależna od upływności torowiska będzie płynęła w otaczającym szyny gruncie tworząc obszary wypływania prądu z szyn do ziemi i jego powrotu do szyn (rys. 7).

Prądy wymiany pomiędzy szynami i otaczającym gruntem są możliwe w przypadkach, gdy do stalowych szyn dotyka mokry grunt. Na styku metal elektrolit glebowy,

zależnie od wzajemnej polaryzacji, wystąpią zjawiska znane z elektrochemii. Jedno to galwanotechniczne – odkładanie materiału elektrolitu na powierzchni metalu, a drugie związane z korozją elektrochemiczną – wybieranie atomów materiału metalowego z powierzchni szyn.



Rys. 7. Rozkład prądu w szynie I_B oraz w otaczającym gruncie I_R (wykres górny) i rozkład napięcia U_R szyn względem ziemi wzdłuż i prostopadle do torowiska pomiędzy pojazdem trakcyjnym pobierającym prąd a podstawą zasilającą [18] przy założeniu stałych parametrów torowiska – rezystancji wzdłużnej i konduktancji przejścia szyny-ziemia dawniej określanej rezystancją przejścia szyna-ziemia (wykres dolny)

6. SKUTKI STREFOWEJ POLARYZACJI SZYN W SIECIACH POWROTNYCH

W przypadku torowisk klasycznych, z podkładami w podsypce tłuczniowej, warunkiem koniecznym dla uwidocznienia oddziaływania polaryzacji szyn, jest styk metalu szyny z elektrolitem glebowym w strefach najsilniejszej wymiany (wypływu lub wpływu) prądu pomiędzy szynami a elektrolitem glebowym. Torowiska tramwajowe, jak podano we wstępie, sprzyjają zjawiskom elektrochemicznym na styku szyna elektrolit glebowy. Według powszechnego poglądu panującego w kręgach eksploatacji torowisk, szyny korodują na stopce i szyjce, a główka ulega zużyciu mechanicznemu przez ścieranie. W zasadzie nie ma różnicy czy na stopce i szyjce szyn zmiany kształtu wywołane są nakładaniem jonów elektrolitu na materiał szyny, czy też wybieraniem atomów żelaza z profilu nowej szyny. Szyny w torowiskach budowy otwartej, które są w miarę dobrze izolowane od elektrolitu glebowego, wykazują się w czasie eksploatacji, a niekiedy już podczas budowy tylko rdzawym nalotem. Nie występuje on na główce szyny, jeżeli po tym torowisku przemieszcza się dowolny tabor szynowy, np. o napędzie spalinowym. Grubość warstwy rdzawego nalotu w zasadzie nie ulega zmianie, jeżeli torowisko jest dobrze odwodnione, ma sprawnie działające studzienki drenujące wodę z opadów atmosferycznych.

Dzięki temu, nawet po kilkunastu latach eksploatacji szyn, można na nich odczytać wyciśnięte napisy dotyczące producenta i typu szyny (rys. 8).



Rys. 8. Oznaczenia na eksploатовanej szynie tramwajowej 180 S wykonane podczas produkcji szyn przez producenta Hutę Katowice w 1991 r.; na powierzchniach bocznych główki, szyjki i stopki występuje tylko rdzawy nalot (zdjęcie wykonane w czerwcu 2017 r.)

W przypadku torowiska pokazanego na rysunku 2 wilgoć utrzymuje się na materiale szyn w okolicach warstwy tłucznia tym dłużej, im bardziej przestrzenie powietrzne pomiędzy fragmentami kamieni tłucznia wypełniają się kurzem, piaskiem i tym podobnymi zanieczyszczeniami, które wchłaniają i utrzymują wilgoć. Jeżeli na torowisku, początkowo budowy otwartej, zostanie zabudowane przejście dla pieszych i przejazd dla pojazdów drogowych, to na długości szyn odpowiadającej szerokości przejścia lub przejazdu występowanie wilgoci w okolicy materiału szyny i jej utrzymywanie się pojawia się praktycznie już od momentu zabudowy szyn torowiska. W przypadku takiego fragmentu torowiska zelektryfikowanego prądem stałym, należy oczekiwać występowania elektrochemicznego zużycia materiału szyn o charakterze zależnym od wypadkowej polaryzacji szyn względem ziemi oraz od poziomu tej polaryzacji. Kierując się powyższymi przesłankami zaproponowano Tramwajom Warszawskim, aby wytypowane i oznaczone fragmenty demontowanego do remontu torowiska poddać dodatkowej analizie przed wysłaniem odzyskanych materiałów do recyklingu.

Przykład zdemontowanego fragmentu wyeksploatowanego torowiska pokazano na rysunku 9. W zależności od miejsca, z którego ruszt torowy pochodzi, znajdziemy na stopkach szyn podsypkę z piaskiem oraz innym zabrudzeniem i ewentualnie w okolicach główki szyny bitumiczne fragmenty jako pozostałości po wykonaniu uszczelnieniu zabudowanej szyny. Materiały te utrudniają wzrokową ocenę zużycia szyjki i stopki szyny, a zatem widziany przy demontażu stan nie wpływa na modyfikację powszechnej

opinii o korozji szyn. Nawet proces mechanicznego czyszczenia rusztu torowego metodą wstrząsową poprzez upuszczanie/przewracanie takiej konstrukcji o długości ok. 6 m i ciężarze ok. 1 tony nie powoduje całkowitego odpadnięcia od materiału szyny różnych pozostałości (rys. 10). Pozostałości na powierzchni metalu szyny powodują zmiany kształtu płaszczyzn powierzchni bocznych szyny i sprzyjają w utwierdzeniu obserwatorów w popularnej ocenie występowania korozji jako zmiany w geometrii.



Rys. 9. Widok wzdłuż rusztu – górna fotografia i poprzecznie – dolna fotografia na zdemontowany ruszt torowy (przesło szynowe) po transporcie na plac rozbiórkowy; stan przed mechanicznym czyszczeniem



Rys. 10. Widok fragmentu rusztu torowego (prześła szynowego) z rysunku 9 już po mechanicznym oczyszczeniu metodą wstrząsową; na górnej szynie widoczne są jeszcze pozostałości materiału uszczelniającego pomiędzy płytą a główką szyny

Dopiero po mechanicznym otrząśnięciu prześła szynowego zaczynają być wyraźniej widoczne różnice w kształcie stopki i szyjki szyny w porównaniu do nowej tego samego typu szyny. W obserwowanym/demontowanym przypadku miało miejsce, że w torowisku szyna tramwajowa znajdowała się w wypadkowym (uśrednionym) obszarze wypływu prądu z szyn do ziemi, zaś typu kolejowego tego torowiska była w obszarze powrotu prądu z ziemi do szyn.

6.1. Szyny ze strefy anodowej – wypływu prądu z metalu do ziemi

Szyny toru ze strefy anodowej charakteryzują się występowaniem wyraźnych ubytków materiału żelaza z okolic krawędzi oraz powierzchni trapezoidalnych stopki, a także wżerami w szyjce szyny (rys. 11). Jak się okazuje ubytkom tym towarzyszą też naddatki materiału osadzonego galwanicznie, który to materiał nie odpadł podczas wstrząsów od upadków rusztu szynowego na podłoże przy mechanicznym jego czyszczeniu. Należy przy tym zauważyć, że siła przyklejania się owych naddatków ulega zmniejszaniu w czasie, zwłaszcza podczas składowania tych szyn pod dachem, ponieważ wtedy nawet pod własnym ciężarem odpadają te płyty od szyny, albo pod wpływem chwytania i unoszenia do góry kawałka szyny. Najprawdopodobniej pod zadaszaniem na hali zmniejsza się wilgotność materiału naniesionego na szynę co osłabia siły adhezji.



Rys. 11. Widok wycinka szyny ze strefy anodowej przed piaskowaniem, ułożonego na wadze; widoczne są wyraźne ubytki materiału na krawędzi stopki oraz nierówności powierzchni ścianki bocznej szyjki szyny jak i stopki; na powierzchniach trapezowych stopki widoczne również płyty warstw różnych materiałów

Nawet w przypadkach, gdy szyny są zabudowane w przejeździe lub przejściu dla pieszych nie stwierdzono, aby w dowolnym przekroju poprzecznym szyn, występowały ubytki materiału o zbliżonym charakterze/kształcie. Spostrzeżenie to dotyczy zarówno pojedynczej szyny, jak również obu szyn jednego toru oraz wszystkich szyn linii dwutorowej. Występowanie łączników poprzecznych międzyszynowych i międzytorowych stosowanych w torowiskach tramwajowych sugerowałoby, że szyny powinny znajdować się w zbliżonych warunkach potencjałowych. To zatem sugeruje, że warunki zewnętrzne w okolicach styku materiału szyn z elektrolitem glebowym, mają przynajmniej takie samo znaczenie, jeśli nie większe, niż spadek napięcia w szynach, wynikający z przepływającego prądu na odcinku pomiędzy pojazdem a podstacją. Z tego względu wydaje się być zrozumiałe zjawisko różnego ubytku żelaza po obu stronach stopki szyny, na odcinku, który obsypany był tłuczniem od strony krawężnika po główkę szyny, a po drugiej stronie (między szynami tego toru) tylko częściowo albo nawet wcale.

W wyniku badanego przypadku należy stwierdzić, że największe ubytki żelaza w strefie anodowej odnotowano na odcinkach toru budowy zamkniętej na przejazdach, zaś mniejsze na przejściach dla pieszych i porównywalnie jeszcze mniejsze w obszarach, gdzie występowała podsypka powyżej stopki szyny. Trudno jednoznacznie ocenić, czy spowodowane to było tylko warunkami zewnętrznymi wokół materiału szyn, czy odległościami poszczególnych odcinków szyn od podstacji (punktów powrotnych). Maksymalne ubytki dla wymienionych obszarów występowały na długości około 42 mb szyn badanego (oznakowanego fragmentu) toru. Jest to około 7% długości pomiędzy punktem powrotnym a początkiem oznakowanego fragmentu, jednakże najbliższej tego punktu powrotnego były tory w podsypce, a najdalej na przejeździe.

6.2. Szyny ze strefy katodowej – powrotu prądu z ziemi do metalu

Szyny z toru znajdującego się w strefie katodowej charakteryzują się nadatkami materiału, który nie zawsze odpada od stalowej szyny pod wpływem wywoływanych wstrząsów mechanicznych. Na rysunku 12 pokazano ruszty torowe ze strefy katodowej po mechanicznym oczyszczeniu.



Rys. 12. Widok rusztów torowych z obu torów wyjętych ze strefy katodowej torowiska; stan po wykonaniu czyszczenia mechanicznego metodą wstrząsową

W strefie katodowej na stopkach i szyjkach szyn nie występują wyraźne lokalne wżery i ubytki metalu szyny, które pokazano wcześniej. Na zbliżeniach poszczególnych fragmentów szyn jest widoczna warstwowa łamliwa struktura nałożona w czasie eksploatacji szyn.



Rys. 13. Fragment szyny ze strefy katodowej wraz z mocowaniem do podkładu po procesie mechanicznego oczyszczenia z widocznymi śladami warstw nałożonych w procesie galwanicznego nanoszenia jonów elektrolitu glebowego i odsłoniętego żelaza (właściwego materiału) stopki szyny



Rys. 14. Fragment szyny ze strefy katodowej wraz z mocowaniem do podkładu po procesie mechanicznego oczyszczenia z widocznymi śladami warstw nałożonych w procesie galwanicznego nanoszenia jonów elektrolitu glebowego, ale bez odsłoniętego materiału stopki szyny

Rysunki 13 i 14 pokazują zbliżenia na szyny tego samego toru w niemalże tym samym przekroju poprzecznym – względem tego samego podkładu – porównaj dolną fotografię z rysunku 12. Z tego względu należy przypuszczać, że obie szyny powinny mieć porównywalny potencjał poprzecznego przekroju w odniesieniu do otaczającego ich gruntu (elektrolitu glebowego). Jednak charakter nałożonych warstw oraz trwałość przyczepności tego materiału do żelaza szyn jest różny. Wynika, to zatem bezpośrednio z warunków zewnętrznych otaczających szyny w czasie eksploatacji. Potwierdzeniem tego wniosku są kolejne fotografie (rys. 15 i 16), na których wyraźnie widać wysokość/poziom do którego podsypka dotykała szyjkę szyny. Przypominając widok poziomu zawilgocenia na szyjce szyny pokazany na rysunku 2 oraz fotografię stanu powierzchni bocznych szyjki szyny w torowisku budowy otwartej (rys. 8), widać wyraźnie, że na rysunku 15 śruba mocująca stopkę szyny do podkładu była zakryta tłuczniami i związanym z tym zabrudzeniem. Na rysunku 15 widać, że im dalej od śruby w prawą stronę tym poziom obsypania tłuczniami opadał. Natomiast na rysunku 16 poziom podsypki opadał w lewym kierunku, patrząc na fotografię. Świadczą o tym widoczne krawędzie warstw odstających od powierzchni szyjki szyny.

Warstwowy charakter odpadającego materiału należy tłumaczyć warunkami atmosferycznymi występującymi w czasie eksploatacji. Być może pewien wpływ mają również nocne przerwy w ruchu, ponieważ wtedy nie występują w szynach na szlakach prądy trakcyjne i potencjał szyn można uznać za stały na całej długości szlaku.



Rys. 15. Fragment szyny ze strefy katodowej po mechanicznym oczyszczeniu ukazujący poziom zmian geometrii powierzchni stopki i szyjki szyny wywołanych procesami elektrochemicznymi

Na procesy elektrochemiczne wokół torowiska zarówno galwaniczne jak i korozyjne największy wpływ ma woda. W naturalny sposób pojawia się ona na torowisku w postaci opadu atmosferycznego. Jeżeli temperatura powietrza jest powyżej zera stopni Celsjusza, to ta niemal destylowana opadowa woda przyczynia się po zetknięciu z gruntem do dysocjacji



Rys. 16. Fragment szyny ze strefy katodowej po mechanicznym oczyszczeniu ukazujący poziom zmian geometrii powierzchni stopki i szyjki szyny wywołanych procesami elektrochemicznymi oraz odsłonięty do rdzennego metalu szyny fragment stopki

wszystkich napotkanych związków chemii nieorganicznej, tworząc elektrolit glebowy lub rozcieńcza jego stężenie. Jeżeli torowisko jest dostatecznie dobrze odwadniane to nadmiar wody (elektrolitu glebowego) spłynie z torowiska. Czysta świeża podsypka utrzyma wilgoć tylko na powierzchni kruszywa i po zakończeniu opadu deszczu rozpoczyna się proces schnięcia poczynając od wierzchnich warstw. Czas osuszania tłucznia stykającego się z materiałem szyn narasta wraz zabrudzeniem podsypki i wypełniania przestrzeni pomiędzy kamieniami tłucznia kurzem i piaskiem. Ten ostatni proces ma szczególne znaczenie jeżeli tłuczeń nasypywany jest w torowisku powyżej stopki szyny i szybkość tego procesu rośnie wraz z poziomem zasypiania szyn. To tłumaczy dlaczego im bliżej stopki szyny tym grubsze są warstwy nałożone galwanicznie lub większe wżery korozji elektrochemicznej w przypadkach nadsypania tłucznia powyżej stopki szyn.

Wyższe temperatury powietrza bez opadów sprzyjają wysychaniu coraz głębiej położonych warstw tłucznia. Brak wilgoci (elektrolitu glebowego) zatrzymuje procesy galwanicznego odkładania materiału na szynach. Najprawdopodobniej ponowny opad deszczu przynosi nowy skład elektrolitu glebowego i dzięki temu tworzona jest inna kolejna warstwa powłoki na rdzennym materiale szyn. W początkowym okresie eksploatacji torowiska ogniska procesów galwanotechnicznych występują w miejscach styku metalu szyn z kawałkami tłucznia, z czasem ulegając zwiększeniu w miarę zabrudzenia tłucznia i rozrastania się powłoki.

Analizując odcinki zabudowanego torowiska w strefach katodowych i anodowych, należy zauważyć, że proces odkładania jonów elektrolitu glebowego w wolnych dostępnych przestrzeniach ulegnie spowolnieniu i ewentualnemu zatrzymaniu po wypełnieniu dostępnych przestrzeni lub przekroczeniu barier oddziaływania elektrycznego. Procesy korozyjne powodują wytwarzanie produktów korozji, które są z reguły objętościowo znacznie większe od objętości tworzących je składników. Zatem produkty korozji rozpychają się. Z tego względu proces korozji może się zatrzymać, gdy zabraknie składnika korozji, np. żelaza lub tlenu. W przypadku torowiska zamkniętego woda wraz z tlenem będzie dostarczana z opadami deszczu i właśnie ta woda może dodatkowo wypłukiwać rozpuszczalne produkty korozji z dostępnych przestrzeni.

Na rysunku 16 widoczna jest szyna z odsłoniętym kawałkiem stopki szyny bez wierzchniej warstwy galwanicznego nalotu, który generalnie ma rdzawy kolor. Odpadający płat nalotu odsłonił powierzchnię stopki charakteryzującą się barwą ciemnogrnatową. Powierzchnia szyn takiej barwy jest spotykana podczas badań z wykorzystaniem zacisku pomiarowego [16] do stopki szyny eksploatowanego od kilku lat torowiska klasycznej budowy z nadsypanym tłuczniem. Doświadczenia [19] wykazują, że taką warstwę należy usunąć, aby uzyskać faktycznie metaliczny styk zacisku pomiarowego z żelazem szyny.

7. METODYKA OCENY SKUTKÓW ELEKTRYCZNEGO ZUŻYCIA SZYN W TRAMWAJOWYCH SIECIACH POWROTNYCH

Tramwaje Warszawskie (TW) w eksploatacji realizują kontrolne pomiary zużycia główki szyn. W przypadku badanego torowiska ekipa pomiarowa TW dokonała pomiarów co 3 mb obu szyn na wytypowanych odcinkach tuż przed ich demontażem. Dzięki obmierzonym profilom główki można określić ubytek materiału szyny na skutek oddziaływania mechanicznego pojazdu na tory. Demontowane z torowiska odcinki rusztu szynowego wynoszą 6 mb, co wynika ze względów logistycznych (transportowych). Wytypowane oznaczone fragmenty torów były przeglądane na placu przed mechanicznym wstrząsowym czyszczeniem, a po tym procesie selekcjonowane do dalszej obróbki lub utylizacji. Kryterium wyboru odcinków 0,5 mb (długość wynika również ze względów logistycznych) były uwidocznione ubytki w stopce i szyjce szyn. Wzrokowa subiektywna ocena dwóch niezależnych obserwatorów dotyczyła grubości i szerokości materiału stopki. Nie stwierdzono żadnego przypadku utraty ciągłości materiału szyjki szyny poza kilkoma przypadkami otworów technologicznych wytwarzanych przez producenta na końcu odcinka szyn (rys. 17).



Rys. 17. Spoina spawania elektrycznego dwóch końców szyn kolejowych dostarczonych przez producenta, o czym świadczą okrągłe otwory technologiczne w szyjce szyny, po dwa na każdą stronę od spoiny

Wybór odcinków szyn do dalszej analizy poprzedzała dyskusja. W celach porównawczych przyjęto większą liczbę próbek, zwłaszcza odcinków szyn ze strefy anodowej. Pierwotnie przewidywano porównanie masy półmetrowego odcinka nowej szyny z masą uzyskiwanych brył szynopodobnych o faktycznej długości 0,5 m. Od tak uzyskanej wartości należało jeszcze ująć oszacowaną masę ubytku główki szyny i tym sposobem podać masę jaką utracono ze względów elektrycznych.

Weryfikacja zaplanowanej metody natrafiła na kilka nieprzewidzianych trudności. Pierwsza wynika z różnych rodzajów szyny tramwajowej jakie wystąpiły na wytypowanym do badań odcinku. Różnice pomiędzy szynami 60R1 i 60R2 pokazanymi w rozdziale 4 są nieznaczne w porównaniu z szynami typu 180 S czy TB. Najistotniejszym fragmentem na który należy zwrócić uwagę jest grubość kierownicy (rys. 18). Ma ona wpływ na faktyczną masę 1 mb szyny, a w czasie eksploatacji nawet w torowisku zabudowanym/zamkniętym, gdzie i zewnętrzna powierzchnia kierownicy może ulegać deformacji, to i tak jej grubość pozwala ustalić typ szyny zwłaszcza przy braku dostępu do dokumentacji powykonawczej torowiska. Metr szyn starego typu okazał się cięższy i pomimo widocznych ubytków korozyjnych oraz przy oszacowanym zużyciu mechanicznym danej próbki po wszystkich zabiegach rachunkowych względem nowej modelowej szyny 60R2, jako szyny odniesienia, otrzymano ujemny wynik dla masy ubytku elektrycznego. Wobec takich wyników zrodziło się jeszcze inne pytanie, czy na otrzymywany wynik ma wpływ masa występujących naddatków?



Rys. 18. Widok na przejście szyny rowkowej typu 180 S w rowkowi Ri60 na 31 odcinku szyn przewidywanych do dalszego badania; istotna różnica pomiędzy tymi szynami to grubość kierownicy wyraźnie widoczna na zdjęciu

Do badań zastosowano metodę Archimedesusa w celu określenia ciężaru właściwego próbek szyn zwrócono uwagę, na pewną nasiąkliwość pozostałości galwaniczno-korozyjnych na powierzchniach szyn. Półmetrowe odcinki szyn wyjmowane z wody zabierały ze sobą nawet do 20 dkg medium pomiarowego (wody), które należało w menzurce uzupełniać.

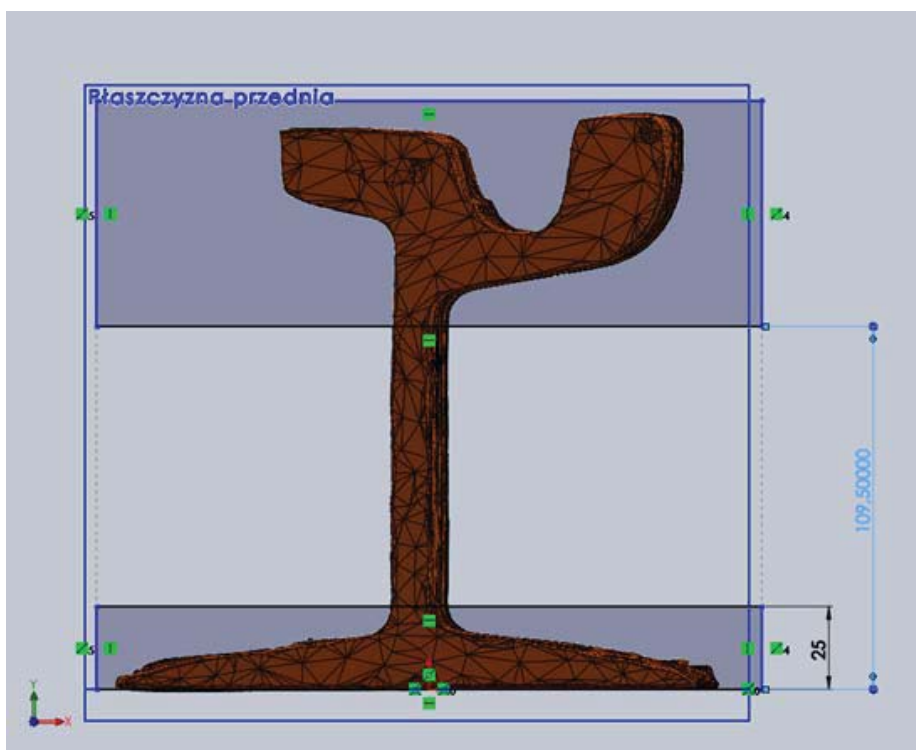
Współczesna technika komputerowa umożliwia skanowanie różnych powierzchni, np. w celu określenia jakości obróbki powierzchni. W ramach tej pracy podjęto próby

zeskanowania kilkunastu próbek w celu oceny zużycia mechanicznego i elektrycznego. Na rysunku 19 pokazano stanowisko do skanowania przedmiotów, na którym dokonano cyfryzacji wybranych próbek. Wszystkie odcinki szyn podane skanowaniu zostały przed skanowaniem wypiąskowane. Należy podkreślić, że proces piaskowania zmniejszał masę próbek w granicach $0,3 \div 0,8$ kg dla szyn tramwajowych i $0,5 \div 0,9$ kg dla szyn kolejowych. Odrzucono próbę podwójnego skanowania odcinka szyny przed i po piaskowaniu, a to ze względu na fakt, że tylko linie cięcia szyny tworzyłyby płaszczyzny odniesienia. Pierwsze próby skanowania i dalszej obróbki wyników zwróciły uwagę, na fakt, że same płaszczyzny cięcia nie są zawsze równoległe do siebie, a zatem prostopadłe do osi szyny, co wynika z ustawienia zdeformowanej szyny na stole/podajniku maszyny do cięcia. Dodatkowo trudno jest ustawić szynę równoległe do średnicy stołu obrotowego. Te dwa czynniki należałoby korygować, chcąc wyznaczyć naddatki osadzone na żelazie szyny.



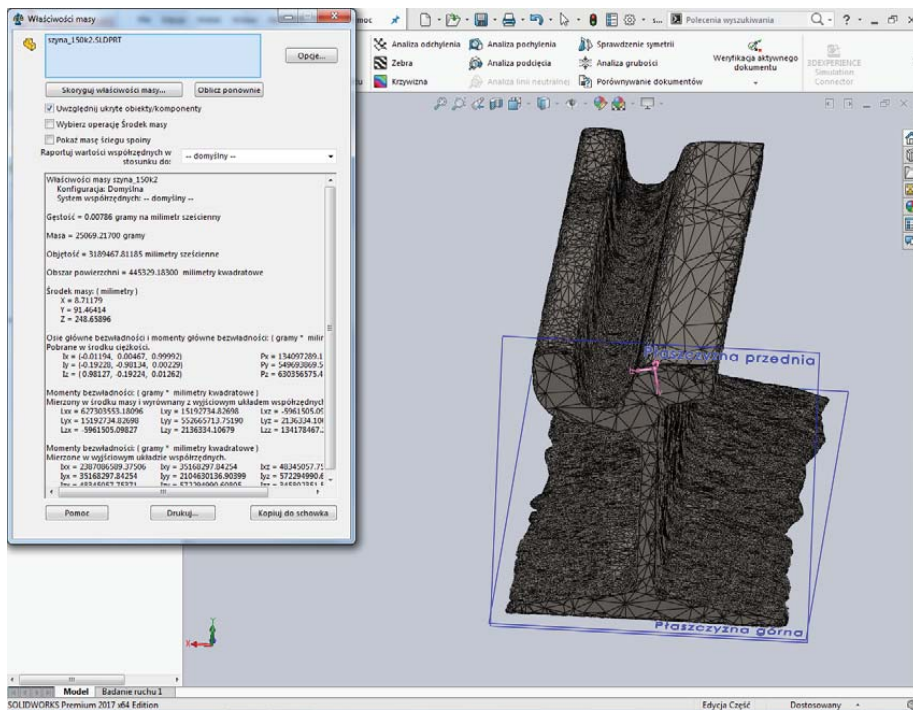
Rys. 19. Stanowisko do skanowania powierzchni ze stołem obrotowym; kamera na przesuwным statywie oraz szyna rowkowa na stole obrotowym ustawiona stopką do góry w czasie jej skanowania – obszar aktualnie obrabiany jest oświetlony niebieskim światłem

Po zeskanowaniu powierzchni tworzących zamkniętą bryłę dokonywano przetworzenia danych na plik czytelny przez program SOLIDWORKS. Logistyczne ograniczenie długości próbek do 0,5 m pozwoliło na nieprzekroczenie dopuszczalnej liczby węzłów siatki możliwych do obróbki posiadanym oprogramowaniem. Zwiększenie długości próbek do rozstawu podkładów w torowisku, ze względu na średnicę stołu obrotowego, jest możliwe, ale wymagałoby zwiększenia kroku skanowania (mniejsza dokładność), aby zachować dopuszczalną liczbę węzłów siatki trójkątów dla programu SOLIDWORKS, albo zachowując rozdzielczość korzystać ze sprzętu i oprogramowania dedykowanego skanerowi.



Rys. 20. Przyjęty podział geometrii szyny tramwajowej na główkę, szyjkę – część środkową oraz stopkę szyn w analizie ich zużycia po czasie eksploatacji; na badanych obiektach szyn tramwajowych wysokość fragmentu szyjki szyny uznano za stałą wartość

Zamiana zamkniętej powierzchni skanowanej na bryłę umożliwia wykorzystanie programów typu SOLIDWORKS lub AUTOCAD do całościowej oceny obiektu, jak i jego objętości, czy też objętości poszczególnych fragmentów wynikających z podziału pokazanego na rysunku 20. Przekrój poprzeczny szyny tramwajowej został podzielony na trzy znane z rysunku 3 obszary – główkę szyny, szyjkę oraz stopkę zgodnie z podanymi wymiarami podziału. W tabeli 2 zestawiono wyniki porównania wzorca szyny z próbką szyny pochodzącej z torowiska uzyskane dla jednego ze zeskanowanych odcinków szyny pokazanego na rysunku 21.



Rys. 21. Widok ekranu programu SOLIDWORKS z zeskanowaną szyną rowkową nr 37C z przyjętym układem odniesienia (płaszczyzna przednia i górna); przyjęta wartość gęstości materiału ($7,86 \text{ kg/m}^3$) oraz wartości wynikowe: masa szyny 25,07 kg, jej objętość $3189,47 \text{ cm}^3$ i powierzchnia bryły $4453,29 \text{ cm}^2$, podano również współrzędne środka masy, osie bezwładności i momenty główne bezładności pobrane w trzech określonych punktach

TABELA 2

Porównanie objętości i masy nowej szyny typu 180 S oraz materiału zużytego w kawałku 37 C również typu 180 S o długości 500 mm

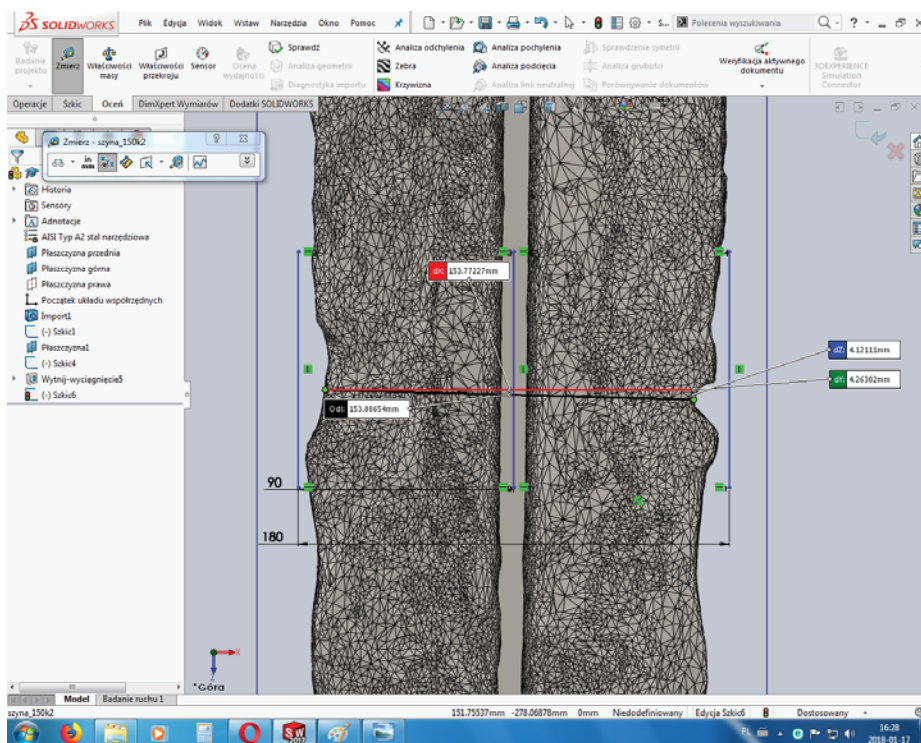
Lp.	Część szyny	Szyna nowa		Materiał zużyty		Zużycie [%]	
		Obj. [cm^3]	Masa [kg]	Obj. [cm^3]	Masa [kg]	[cm^3]	[kg]
1.	Główka	2281,80	17,93	543,45	4,27	23,81	23,81
2.	Szyjka	507,24	3,98	72,13	0,56	14,22	14,07
3.	Stopka	1190,98	9,36	256,99	2,01	21,57	21,47

Okazuje się, że przy przyjętym podziale geometrii szyny rowkowej 180 S główka szyny tramwajowej stanowi ponad 55% wagi całej nowej szyny, zaś stopka prawie 29% tej wagi, a pozostałe ok. 16% to materiał szyjki. W przypadku analizowanych kawałków szyn na odcinku toru budowy zamkniętej (przejeździe) ubytek materiału na skutek tarcia mechanicznego wynosi ok. 20 – 25% materiału tego fragmentu szyny, zaś w przypadku półmetrowych odcinków elektrochemiczne zużycie stopki sięga ok. 20 do 23% materiału nowej stopki. Ubytek materiału szyjki szyny jest najmniejszy i wynosi ok. 14 – 16% masy szyjki nowej szyny.

Oprogramowanie pozwala na analizy plastrów o dowolnej grubości. W tym przypadku można napotkać trudności związane z brakiem płaszczyzny odniesienia na bryle odpowiadającej szynie pochodzącej z torowiska. Oznacza to, że płaszczyzna dokonanego cięcia szyny nie jest prostopadła do osi szyny. Jedną z metod jest weryfikowanie długości obwodu dokonywanego przekroju poprzecznego. Wzorec ma najmniejszy z możliwych obwodów, zwłaszcza prostokątnego przekroju szyjki szyny. Każdy wżer korozyjny zwiększa długość obwodu elementu, podobnie jak i przekoszenie osi szyny. W przypadku trapezoidalnej części stopki powyższa uwaga jest prawdą, jeżeli nie następują istotne ubytki na zewnętrznych krawędziach stopki.

Wartości podane w tabeli 2, w przypadku analizy plasterków o długości, np. 1 cm dają w efekcie istotne różnice w ocenie zużycia materiału stopki. Przy prawie stałej wartości zużycia główki szyny występują istotne różnice w ubytkach materiału stopki nawet do ok. 50% jej masy wyjściowej. Zdarzają się tak głębokie wżery, że podstawa stopki szyny zamiast 180 mm szerokości ma lokalnie szerokość poniżej 152 mm (patrz przykład wymiarowania głębokości wżeru – rys. 22).

W przypadku szyn badanego przejazdu można stwierdzić, że najgorszy wycięty półmetrowy odcinek doznał korozyjnego zużycia materiału stopki szyny, który nie przekraczał 26% masy wyjściowej stopki, przy ok. 25% procentowym mechanicznym zużyciu

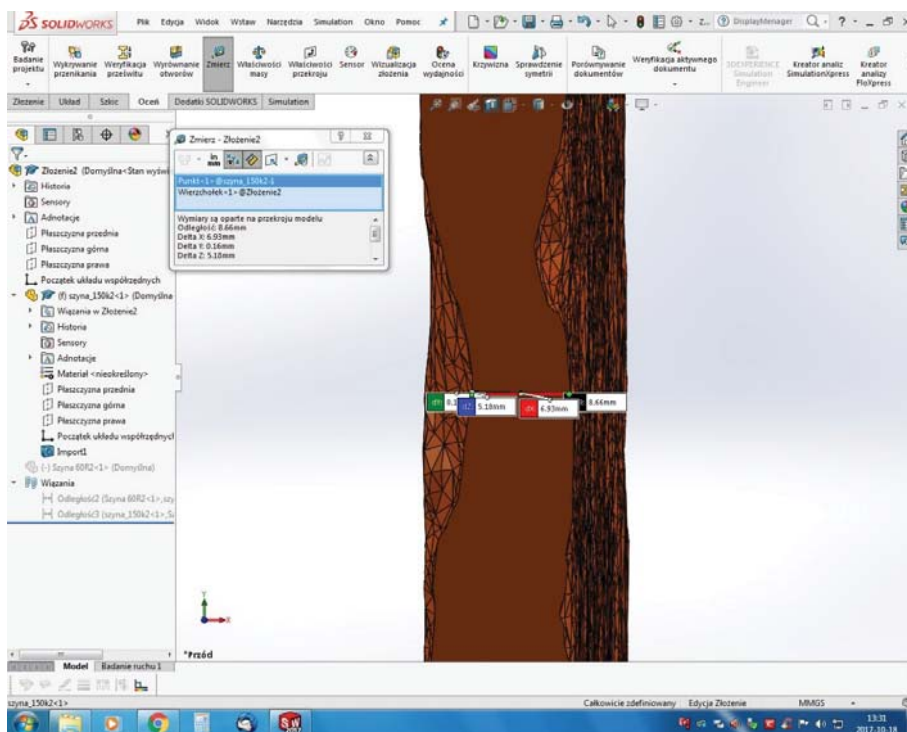


Rys. 22. Widok skanu stopki szyny za pomocą programu SOLIDWORKS w przekroju od strony szyjki (środkowy pasek) z przykładem wymiarowania materiału zeskanowanej próbki szyny

główki szyny. Na omawianym półmetrowym odcinku ocena wykonana metodą klasyczną (od masy wzorca odjęta masa po piaskowaniu) dała ubytek rzędu 23% masy nowej szyny. Procentowe wyniki wydają się być zbliżone, ale lokalne fragmenty stopki szyny o długości do kilkunastu milimetrów wykazują ubytki masy tej części szyny na poziomie 50%. Powstaje zatem pytanie, jak oceniać zwiększenie zagrożenia dla pojazdu spowodowane utratą fragmentów materiału konstrukcyjnego szyny w obszarze stopki?

Program SOLIDWORKS umożliwia również wymiarowanie wysokości pozostałego po eksploatacji materiału stopki szyny. Oczywiście w tym miejscu należy zaznaczyć, że powierzchnia dolna stopki, która w nowej szynie jest płaska, w wyniku elektrycznych oddziaływań płaska być przestaje. W znacznym stopniu utrudnia to analizę geometrii, jak i ewentualnych naprężeń mechanicznych szyny.

Na rysunku 23 pokazano zwymiarowanie przykładowego wżeru w szyjce szyny. Jeżeli ubytek taki wystąpi w połowie wysokości szyjki danego typu szyny to nie czyni on szkody ponieważ jest to oś obojętna szyny w której można wykonywać technologiczne otwory, np. do przyłączania kabli powrotnych lub kabli łączników międzyszytowych i międzytorowych. Na rysunku 23 jest widoczne, że materiał w szyjce szyny w przekroju cięcia (kolor brązowy) nie jest prostokątem, a jakąś pofalowaną wstęgą. W pokazanym fragmencie ubytek wymiaru geometrycznego materiału osiąga prawie 50%. Należy w tym miejscu przypomnieć, że procentowy ubytek masy szyjki na długości odcinka 0,5 m mieścił się w granicach do 14% masy szyjki.



Rys. 23. Przekrój szyjki szyny wzdłuż wysokości widziana programem SOLIDWORKS w przekroju od strony jednej z płaszczyzn cięcia szyny

Osobnym zagadnieniem jest ocena wpływu korozji elektrochemicznej szyn na geometrię niewidocznej części zabudowanego torowiska w przejeździe, w czasie normalnej eksploatacji, a także stabilności pracy toru podczas przejazdu pociągów.

Oszacowane elektryczne ubytki materiału szyn ze strefy katodowej są na poziomie kilku procent masy stopki lub szyjki, a więc mogą wynikać z tolerancji wykonania szyn przez producenta. Pozostaje zaś otwarte pytanie, jakie materiały osadzają się na stopkach i szyjkach szyn zasypanych tłucznem powyżej stopki szyny? Czy są to materiały o podobnym składzie chemicznym, co osadzone na szynach w strefach anodowych?



Rys. 24. Widok śruby z nakrętką mocujące stopkę szyny do podkładu, które pracowały w strefie katodowej; kolory rdzy wskazują, że poziom tłucznia nieznacznie przewyższał stopkę szyny, mechaniczne otrząsanie ujawniło pęknięcie wzdłuż materiału stopki szyny po prawej stronie od mocującej śruby

Oglądane szyny ze strefy katodowej w kilku przypadkach pokazały zjawiska uwidocznione na rysunku 24. Odłamaniu naniesionej galwanicznie warstwy towarzyszy rysa, pęknięcie na poziomie materiału stopki szyny. W niektórych przypadkach przypuszczano, że warstwa osadzona galwanicznie była również na podstawie stopki szyny i odpadając podczas wstrząsów pozostawia krawędź, ale nie w każdym przypadku. Wydaje się, że przy ewentualnym kontynuowaniu pracy związanej z demontażem starego torowiska, należy zadbać o inne techniki badania przekroju szyn, bez konieczności ich wstępnego otrząsania.

8. PODSUMOWANIE

Oceniając zagrożenie podziemnej konstrukcji metalowej ułożonej wzdłuż torowiska zelektryfikowanego prądem stałym [20], stwierdza się występowanie stref zagrożenia wymagających aktywnej ochrony przed prądami błędzącymi, dopuszczalnego poziomu

zagrożenia, jak i stref, gdzie to zagrożenie nie występuje. Potwierdzono, że podobna sytuacja ma miejsce wzdłuż torowiska, pomiędzy punktami przyłączenia kabli powrotnych. W czasie ruchu taboru występują strefy, które się przemieszczają wraz ruchem pojazdów, a amplitudy oddziaływania zależą od wielkości pobieranego z sieci zasilającej prądu. O ewentualnych skutkach decydują wartości średnie prądów wymiany szyny-ziemia (otaczający elektrolit glebowy) i ich polaryzacja.

Skutki oddziaływania stref będą widoczne na niezaizolowanych elektrycznie powierzchniach szyn, które bezpośrednio stykają się z elektrolitem glebowym. W przypadku klasycznych torowisk podsypkowych budowy otwartej najbardziej narażone są odcinki zabudowane z przejściami lub przejazdami przez tory umożliwiającymi przemieszczanie się ludzi i pojazdów mechanicznych na tym samym poziomie co tory. Im wyżej ponad stopkę szyny nasypany jest tłuczeń, tym większe jest prawdopodobieństwo wystąpienia skutków elektrycznego zużycia szyn. Szybkość korozji i elektrolitycznego osadzania materiału zależna jest od stopnia zabrudzenia tłuczni. Im tłuczeń jest czystszy, tym procesy elektrochemiczne są wolniejsze, w tych samych warunkach potencjałowych. Utrzymywanie się wilgoci z opadów atmosferycznych w torowiskach budowy zamkniętej na tłuczniu w porównaniu do takich samych, ale zasypanych tłuczniem powyżej stopki, powoduje, że proces zabrudzenia tłuczni w czasie eksploatacji różnicuje szybkość degradacji szyn w tym samym czasie eksploatacji przy takich samych warunkach elektrycznych szyn względem otoczenia.

Zastosowanie nowoczesnego narzędzia badawczego – skanowania powierzchni do badania elektrochemicznego zużycia szyn pozwoliło określić ubytki w analizowanych półmetrowych próbkach zdemontowanych szyn. Stwierdzono, że procentowy ubytek materiału szyny z główki i stopki są porównywalne w najniekorzystniejszych zaobserwowanych przypadkach. Niestety, o ile zużycie główki szyny jest równomierne na badanych odcinkach, to korozyjne wżery równomierne już nie są. Zmniejszając długości analizowanych odcinków szyn uzyskuje się wzrost ubytku materiału stopki nawet do 50% początkowej masy stopki. Nie uzyskano jeszcze odpowiedzi jakie ubytki, co do kształtu lub masy, są dopuszczalne ze względów bezpieczeństwa pracy torowiska.

Problemem do rozstrzygnięcia jest to, czy zjawiska pasywacji stali w betonie dotyczą również współczesnych torowisk budowy zamkniętej na podlewie betonowym?

Zmiany jakie są związane z nowoczesnym taborom tramwajowym – rekuperacja do sieci – wywołują zmniejszenie i rozdrobnienie stref elektrycznego oddziaływania, co bez wątpienia jest korzystne dla trwałości elektrycznej torowiska. Jednocześnie utrudniają typowanie stref oddziaływania, podobnie jak utrudnia ją dobór parametrów podstacji i okablowania jej sieci.

Wobec coraz większej długości tramwajowych torowisk budowy zamkniętej, w których widoczna jest jedynie główka szyny, pojawia się konieczność zbudowania narzędzia umożliwiającego bezinwazyjną diagnostykę stanu technicznego szyjki i stopki szyn takich torowisk.

Podziękowania

Autorzy pragną tą drogą podziękować pracownikom Zakładu Energetyki Trakcyjnej i Torów Tramwajów Warszawskich za pomoc i współpracę w zrealizowaniu tematu statutowego, którego istotny fragment jest przedmiotem artykułu.

Praca wykonana w ramach działalności statutowej: Temat 500-063500/001.

LITERATURA

1. PN-EN 50122-2 Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacjonarne. Część 2, Środki ochrony przed oddziaływaniem prądów błędnych wywołanych przez trakcję prądu stałego.
2. Dąbrowski G.: Torowiska tramwajowe – roboty budowlane cz. 1 i cz. 2. Inżynier Budownictwa, nr 6 (151), i nr 7/8 (152) str. 114-118 i 113-118, rok 2017. http://www.inzynierbudownictwa.pl/technika,materialy_i_tehnologie,artykul,torowiska_tramwajowe__roboty_budowlane__pelna_wersja_artykulu_,10247
3. PN-EN 50163 Zastosowania kolejowe – Napięcia zasilania systemów trakcyjnych.
4. <http://www.igkm.pl/site/wiadomosci,3327,zzyciaizby.html> – Sprawozdanie z Komisji Zasilania IGKM w Zawierciu/Częstochowie w roku 2012.
5. <http://www.igkm.pl/site/wiadomosci,3413,zzyciaizby.html> – Sprawozdanie z Komisji Zasilania IGKM w Kazimierzu Dolnym/Lublinie w roku 2013.
6. <http://www.igkm.pl/site/wiadomosci,3904,zzyciaizby.html> – Sprawozdanie z Komisji Zasilania IGKM w Poznaniu w roku 2015.
7. Dąbrowski J.: Zasilanie dwustronne czy wzmocnione sieci górnej w tradycyjnym systemie trakcji tramwajowej? Biuletyn Komunikacji Miejskiej, nr 136, s. 41–45, 2015 r.
8. Mierzejewski L., Szelaż A.: Sieci powrotne zelektryfikowanego szynowego transportu miejskiego. TTS, nr 11, s 56–65, 2005 r.
9. Karasek S.: Tabor tramwajowy w Polsce. TTS, nr 11, s. 30–33, 1996 r.
10. Igielski T.: Tabor tramwajowy w Polsce po 1945 roku. TTS, nr 09, s 12–17, 1997 r.
11. Graf M.: Nowy tabor tramwajów w Polsce ,TTT, nr 07-08, s. 46–63, 2015 r.
12. PN-92/E-05024 Ochrona przed korozją Ograniczanie upływu prądów błędnych z sieci prądu stałego.
13. Dąbrowski J.: Płyta CD z V Konferencji Naukowo-Technicznej „Współczesne Technologie Przeciwnokorozyjne” Smardzewice 11-13.04.2011 r.
14. Dąbrowski J.: Wpływ rekuperacji energii w systemie miejskiego transportu szynowego na korozyjne zagrożenie podziemnej infrastruktury metalowej. Ochrona przed Korozja ,vol. 54, nr 8, s. 508–512, 2011 r.
15. EN 14811 „Railway applications – Track – Special purpose rail – Grooved and associated construction”. Sierpień 2006 r.
16. Dziuba W.: Sieć powrotna i prądy błędne. Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki Seria A: Prace oryginalne 1995 r.
17. Schienenformen Katalog Voest-Alpine Schienen 1990.
18. Dąbrowski J.: Koncepcja potencjałowej oceny stanu technicznego sieci powrotnej Dok. IEL nr arch.: NTE/22/2012; praca wykonana w ramach działalności statutowej Temat 500-043900/016.
19. Dąbrowski J., Dziuba Wł.: Nowy sposób pomiaru jednostkowej konduktancji przejścia szyn względem ziemi w czasie ruchu pojazdów. Dok. IEL nr arch.: NTE/79/2001.
20. Sokólski W.: Elektrochemiczne metody wykrywania i eliminowania anodowych stref korozyjnych na podziemnych konstrukcjach metalowych w miastach Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 1980.

ELECTROCHEMICAL WEAR
OF RAILS IN TRAM TRACKWAY

Józef DĄBROWSKI,
Przemysław SZOSTAK, Ryszard SZYSZKO

ABSTRACT *Mechanical wear of rails is a phenomenon known and described in the literature and also visible in the track for an outside observer. The electrification by direct current of rail transport causes additional hazards in the track in relation to the rails. In the technical literature, there are many items regarding the impact of currents straying on underground metal infrastructure and ways to protect these structures. In this work, attention is paid to the fact that stray currents also contribute to wear – changes in the geometry of rails – in places other than the rail head. Examples of such wear are given to the conditions that must occur in order for the effects of stray currents to become visible.*

Keywords: *stray currents, trackway*

Mgr inż. Józef DĄBROWSKI – w 1981 r. ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej o specjalności maszyny elektryczne. Pracownik IEL od 1981 r. w Zakładzie Maszyn Elektrycznych, a od 1983 r. w Zakładzie Trakcji Elektrycznej. Tematyką prądów błądzących zajmuje się od 1990 r.



Mgr inż. Przemysław SZOSTAK – w 2010 roku ukończył studia na wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej. Od 2011 roku jest pracownikiem Zakładu Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki. Zajmuje się projektowaniem konstrukcji mechanicznych.

Inż. Ryszard SZYSZKO – absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. Do 2005 roku związany z usługami i przemysłem. Od 2005 r. pracuje w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z przekształtnikami energoelektronicznymi oraz problematyką prądów błądzących.



