

Jacek Caban, Leszek Gardyński

Analiza stabilności wyboczeniowej toru bezстыkowego

Rozwój gospodarczy w znacznym stopniu zależy od sprawnego systemu transportowego, który powinien umożliwiać niezawodny, bezpieczny i efektywny przewóz towarów zarówno w ruchu krajowym, jak i międzynarodowym [12]. Zagadnienia bezpieczeństwa w ruchu kolejowym mają ogromne znaczenie w integracji i wprowadzaniu przepisów wspólnotowych UE z polskimi.

W dyrektywie 2004/49 Parlamentu Europejskiego i Rady z 2004 r. „w sprawie bezpieczeństwa kolei” zawarto wymagania dla bezpieczeństwa kolei między innymi wymóg Systemów Zarządzania Bezpieczeństwem oraz wymóg powołania niezależnych organów do badania wypadków kolejowych. Dyrektywa 2004/49 określa również drogę do ustalenia CST (ang. *Common Safety Targets* – Wspólnych Celów Bezpieczeństwa), czyli minimalnych wymagań dla systemu kolejowego [13].

W artykule przedstawiono możliwość wystąpienia zagrożenia dla bezpieczeństwa w ruchu kolejowym a tym samym doprowadzenie do wykolejenia pociągu, w przypadku kradzieży wkrętów mocujących szyny do podkładów na danym prostoliniowym odcinku torów linii regionalnych. Analizę oparto na faktycznym przypadku kradzieży, który miał miejsce na jednym z mostów kolejowych. Linie regionalne w Polsce charakteryzują się dość starą infrastrukturą oraz dość umiarkowanym, mieszanym ruchem pociągów (rzędu 20–50 par na dobę) [9]. Analizowany w pracy odcinek toru wynosi 20 m, a ubytki w mocowaniach występowały w torze 1 w całości na długości 20 m, natomiast w torze 2 – na części analizowanego odcinka toru. Łączna liczba ubytków wkrętów do mocowań wyniosła 400.

Kształt i wymiary łbów i gwintu wkrętów określone są w normie PN-K-80021:1989 [16] *Nawierzchnia kolejowa, Wkręty z łbem prostokątnym*, natomiast wymagania i badania wkrętów ujęto w normie PN-K-80030:1989 *Nawierzchnia kolejowa, Śruby i wkręty, Wymagania i badania* [17]. Wkręty stosowane są do łączenia elementów nawierzchni kolejowej z podkładami drewnianymi lub betonowymi [4]. Złączki szynowe (w tym podkładki), powinny być założone prawidłowo i we właściwej liczbie i odpowiednio zamocowane [10], a więc z użyciem przewidzianej liczby śrub i wkrętów. Wymiana podkładek powinna być tak wykonana, aby przed przejściem każdego pociągu szyny leżały na podkładkach i były przymocowane do wszystkich podkładów co najmniej dwoma wkrętami lub hakami po jednym z każdej strony szyny oraz dwoma śrubami stopowymi przy zamocowaniu pośrednim [10]. Wkręty, śruby stopowe, łapki i pierścienie mogą być wymieniane jednocześnie na nie więcej niż trzech sąsiednich podkładach i tylko w jednym toku szynowym [10]. Codziennie przed ukończeniem robót wszystkie wkręty lub haki oraz śruby stopowe powinny być założone i dokręcone [10]. Wkręty lub haki oraz łapki mogą być wymieniane jednocześnie tylko w szynie jednego toku i nie więcej niż w trzech sąsiednich podkładach [10]. Nie

wolno otwierać ruchu na moście, jeżeli brakuje chociaż jednej mostownicy lub zamocowania szyn.

Punkt 10 instrukcji mówi, że: jeżeli w torze na moście wbudowano wszystkie potrzebne mostownice lub podkłady i każdą szynę do każdej mostownicy lub podkładu przymocowano co najmniej 2 wkrętami i śrubami stopowymi dopuszcza się otwarcie ruchu pociągów z prędkością nie większą niż 15 km/h, z tym, że prędkość pierwszego pociągu przejeżdżającego po moście należy ograniczyć do 10 km/h. Na podstawie wyników badań określa się stan złączy na odcinku toru jako:

- dobry – gdy liczba złączy brakujących, luźnych lub zakwalifikowanych do wymiany nie przekracza 5%;
- dostateczny – gdy liczba złączy brakujących, luźnych lub zakwalifikowanych do wymiany nie przekracza 30%;
- zły – gdy liczba złączy brakujących, luźnych lub zakwalifikowanych do wymiany przekracza 30% [3].

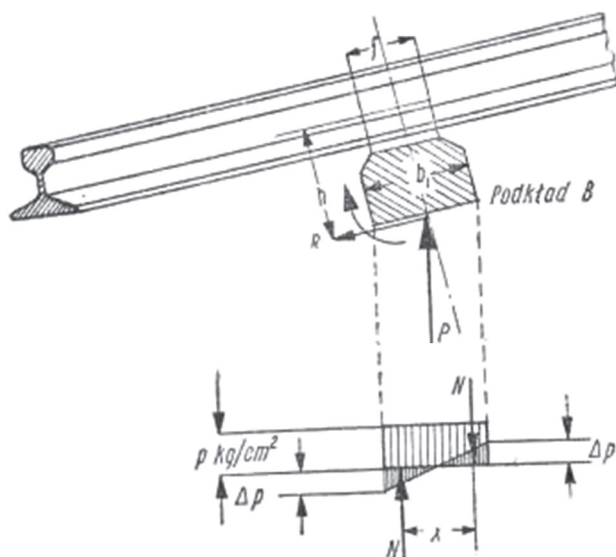
Tor bezстыkowy będzie bezpiecznie eksploatowany przy zachowaniu następujących warunków [3]:

- konstrukcja toru odpowiada wymaganiom standardu danej klasy toru;
- w trakcie układania szyn długich, ich przytwierdzenia i zgrzewania (spawania) nie został przekroczony zakres temperatur od +15°C do +30°C, a wszystkie czynności wykonywane były równolegle w obu tokach szynowych;
- szerokość przemy podsyпки niezależnie od kategorii linii jest nie mniejsza niż 0,45 m, licząc od czoła podkładów; podsyпка jest zagęszczona maszynowo w okienkach i od czoła, a w przypadku braku takich możliwości – wykonana nadsyпка;
- tor lub szyny nie wykazują objawów pękania;
- podsyпка jest w stanie dobrym;
- stan przytwierdzeń określony został jako dobry;
- podkłady wykazują zużycie małe lub przeciętne;
- pomierzone nierówności poziome i pionowe nie przekraczają dopuszczalnych odchyłek eksploatacyjnych, ustalonych dla dopuszczalnej prędkości na torach danej klasy;
- roboty torowe naruszające stateczność toru wykonywano w temperaturach niższych od dopuszczalnych dla danego rodzaju robót zgodnie z §45;
- ostateczną naprawę pęknięć szyn toru bezстыkowego wykonywano w temperaturze neutralnej toku nie pękniętego.

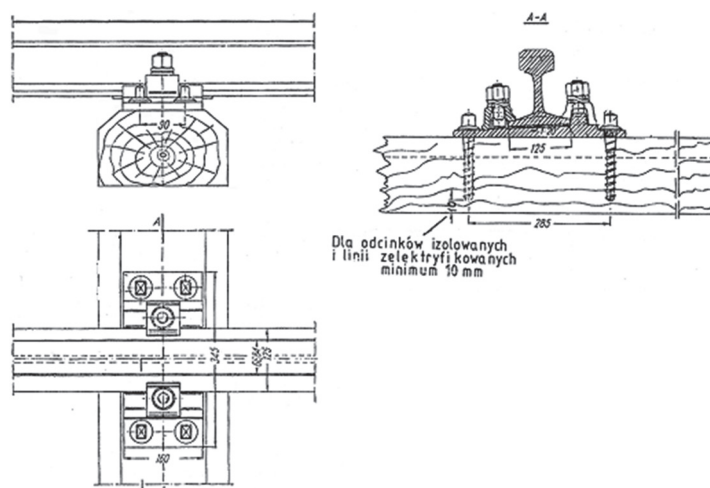
Wnioski wynikające z przepisów bezpieczeństwa

Według [8] na 1 km toru z nawierzchnią S49 (obecnie 49E1), w zależności od obciążenia i rodzaju trakcji (elektryczna, spalino-wa), przypada 1550–1733 podkładów, czyli ok. 31–35 podkładów na odcinku 20 m. Do każdego podkładu powinny być przykręcone 2 podkładki szynowe, każda przy użyciu 4 wkrętów, czyli na 20 m toru znajduje się średnio ok. 248–277 wkrętów. Zatem wykręcenie 200 (najniższa występująca w aktach sprawy dotyczącej rozpatrywanego przypadku kradzieży, liczba wkrętów wykręconych z toru 1) wkrętów bezwzględnie uniemożliwia zachowanie

warunku bezpiecznego ruchu pociągów, stosowanego przy remontach torów, dopuszczającego ten ruch przy zastosowaniu powłoki wkrętów (przy obecności dwóch wkrętów w każdej podkładce, po jednym z każdej strony szyny). Zachowanie tego warunku byłoby możliwe w przypadku gdyby 200 wkrętów wykręcono w sposób równomierny na odcinku 40 m (10 m przed i 10 m za mostem), gdzie powinno być ok. 496–555 wkrętów. Warunek ten nie mógłby być jednak spełniony przy podanej w innym miejscu akt 250 wkrętów wykręconych z toru 1. Z akt wynika również, że rozmieszczenie wykręconych wkrętów było nierównomierne, przez co spełnienie warunku o minimum 2 wkrętach w każdej podkładce po obu stronach szyny było niemożliwe. Krańcowym przypadkiem nierównomiernego rozmieszczenia wykręconych wkrętów byłoby ich wykręcenie ze wszystkich podkładek tylko jednej szyny, co przy ilości ok. 248–277 wkrętów na 20 m toru, a więc ok. 124–139 na jedną szynę było również możliwe. Zasadne wydaje się zatem przeprowadzenie obliczeń stateczności toru również dla przypadku, gdy 20-metrowy odcinek szyny zostaje całkowicie pozbawiony wkrętów (obliczenia w dalszej części). Wykręcenie z toru nr 1 nawet najmniejszej z podawanych aktach liczby wkrętów spowodowało ich brak w liczbie większej



Rys. 1. Współpraca podłoża z przytwierdzonym do szyny podkładem [7]



Rys. 2. Schemat przytwierdzenia typu K szyny 49E1 do podkładów drewnianych (wg zał. 3 instrukcji [10])

niż 30%, a więc kwalifikowało stan przytwierdzeń jako zły, podczas gdy do bezpiecznej eksploatacji toru bezстыkowego wymagany jest dobry stan przytwierdzeń, co oznacza maksymalną liczbę wykręconych wkrętów na poziomie 5%. Na podstawie tego warunku można też stwierdzić, że przepis bezpieczeństwa nie został również zachowany na torze nr 2, gdyż 70 wkrętów wykręconych z 20-metrowego odcinka stanowi ponad 25% ich całkowitej liczby (248–277).

W świetle wykręcenia tak dużej liczby wkrętów istnieje też duże prawdopodobieństwo, że któraś z podkładek, zwłaszcza toru nr 1, nie była przykręcona do mostownicy, a w myśl przytoczonych przepisów ruch pociągów po moście w takiej sytuacji nie powinien się odbywać.

Założenia prowadzonej analizy

Zadaniem wkrętów jest przytwierdzenie podkładek szynowych wraz z szynami do podkładów i przeciwdziałanie wywracaniu szyny, przesuwaniu bocznemu (zmianie rozstawu szyn) oraz częściowo pełzaniu (przesuwaniu osiowemu). Ponadto dzięki wkrętom zmniejszają się naprężenia gnące w płaszczyźnie pionowej, wzdłuż osi szyny (rys. 1). Generowanie sił N dodatkowo stabilizujących oś szyny, zmniejszających naprężenia od zginania pod wpływem obciążenia pionowego nawet o 24%, w stosunku do szyny nie przykręconej [7]. W dalszej części przytoczono niezbędne dane i schematy oraz wykonano obliczenia stateczności 20-metrowego, swobodnego odcinka szyny przy założeniu usunięcia wszystkich wkrętów.

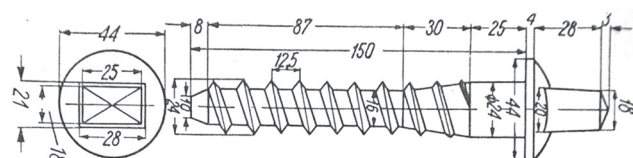
W tabeli 1 zestawiono dane do obliczeń wytrzymałościowych szyn używanych przez polskie koleje. Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie sposób przytwierdzenia typu K dla szyny 49E1 do podkładów drewnianych.

Tabela 1

Dane szyn do obliczeń wytrzymałościowych [2, 3, 10, 14, 15]

Typ szyny/Właściwość	49E1	UIC-60 (S-60)
Pole powierzchni przekroju poprzecznego A	[mm ²] 6297	7687
Wysokość H	[mm] 149	172
Szerokość stopki S	[mm] 125	150
Standardowe długości	[m] 30, 25, 15	25
Moment bezwładności		
– w płaszczyźnie poziomej I_y	[mm ⁴] 3 200 000	5 130 000
– w płaszczyźnie pionowej I_z	[mm ⁴] 18 150 000	30 550 000
Wskaźnik wytrzymałości		
– w płaszczyźnie poziomej $W_y = I_y/0,5S$	[mm ³] 51 200	68 400
– w płaszczyźnie pionowej W_z	[mm ³] 241 000	335 500
Moduł Younga E	[MPa] (2,05 ÷ 2,10) · 10 ⁵	
Współczynnik cieplnej rozszerzalności liniowej α	[1/°C] (1,0 ÷ 1,2) · 10 ⁻⁵	

Na rysunku 3 przedstawiono wkręt typu P do mocowania podkładek szynowych z jego podstawowymi wymiarami geometrycznymi.



Rys. 3. Wkręt do mocowania podkładek szyn 49E1 [8]

Obliczenia siły wzdłużnej powodującej wyoboczenie odcinka szyny długości 20 m pozbawionego wkrętów

Według zał. 7 do instrukcji D1 [10] dopuszczalny wzrost temperatury szyny ponad temperaturę neutralną dla toru z szyn 49E1, ułożonej na podkładach drewnianych na linii prostej, przy założeniu dobrego stanu podsypki (nierówności poziome mniejsze niż 6 mm) wynosi 49°C. Naprężenia ściskające w szynie, wynikłe z samych zmian temperatury, wynoszą wtedy ok. 123,5 MPa według zależności:

$$\sigma_t = \alpha E \Delta t \tag{1}$$

gdzie:

- α – współczynnik cieplnej rozszerzalności liniowej,
- E – Moduł Younga,
- Δt – zmiana temperatury.

Przy przekroju szyny 49E1 $A = 6297 \text{ mm}^2$ odpowiadająca im siła ściskająca w jednej szynie wynosi zatem ok. 777,5 kN (prawy 80 t). Siła ta powoduje skłonność szyny do wyoboczenia i w efekcie zmiany rozstawu szyn.

Jako niebezpieczną wartość siły wzdłużnej, powodującą wyoboczenie sprężyste, przyjęto wartość wynikającą z zależności [6]:

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 E I_y}{(\alpha L)^2} \tag{2}$$

gdzie:

- I_y – moment bezwładności w płaszczyźnie poziomej,
- L – długość odcinka obliczeniowego,
- $\alpha = 0,5$ – dla sztywnego zamocowania końców szyny.

Po podstawieniu danych: $P_{kr} = 66,324 \text{ kN}$ (6,7 t). Wartość tej siły jest prawie 12 razy mniejsza od siły w szynie wyliczonej przy maksymalnym dopuszczalnym wzroście temperatury. Oznacza to, że wyoboczenie 20-metrowej szyny, pozbawionej wkrętów, pod wpływem naprężeń cieplnych może zachodzić już przy wzroście temperatury szyny 49°C/11,7 ≈ 4°C, w stosunku do temperatury neutralnej.

Obliczenia siły bocznej powodującej niebezpieczne przemieszczenie odcinka szyny o długości 20 m pozbawionego wkrętów w temperaturze neutralnej

Wzór na strzałkę ugięcia poziomego f_y zamocowanego sztywno na końcach odcinka szyny długości L , pod wpływem siły bocznej Q ma postać:

$$f_y = \frac{Q L^3}{192 E I_y} \tag{3}$$

zakładając, że wykolejenie zajdzie przy przesunięciu szyny o odległość $f_w = 100 \text{ mm}$ (orientacyjna szerokość powierzchni toczonej koła [11]), można obliczyć wartość siły poziomej, powodującej wykolejenie Q_w , przyłożonej do główki szyny w środku nieprzywytwierdzonego odcinka długości 20 m, która wynosi:

$$Q_w = \frac{192 f_w E I_y}{L^3} = 1612,8 \text{ N} \tag{4}$$

Dopuszczalny nacisk **osi lokomotywy**, w zależności od klasy toru i dopuszczalnej prędkości, wynosi 205–221 t. W praktyce dopuszczalna masa przypadająca na pojedynczą oś lokomotywy wynosi ok. 20 t, a więc 10 t na jedno koło. Przy takiej sile pionowej

nie trudno o wywołanie siły bocznej o wyliczonej wartości. Ponadto należy wziąć pod uwagę fakt, że osie lokomotyw zgrupowane są w wózkach po 2 lub 3, co dodatkowo zwiększa obciążenie i możliwość przesunięcia nieumocowanej szyny. Według zał. 13 i 15 do instrukcji [10], wartości dopuszczalnych odchyłek szerokości toru, zapewniające stabilność jazdy przy dopuszczalnej prędkości 100 km/h wynoszą +10/–7 mm, a wichrowatość na bazie 5 m – maksymalnie 14 mm. Podczas odbioru po naprawie bieżącej parametry te wynoszą odpowiednio +8/–5 mm oraz 12 mm, a po naprawie głównej +4/–4 mm oraz 10 mm. Są to wartości znacznie mniejsze niż przyjęta za niebezpieczną wartość rozsunienia, wynosząca 100 mm.

Obliczenia maksymalnej siły przenoszonej przez pojedynczy wkręt

Według [8] opór wkrętu do szyn typu S49 (obecnie 49E1) na wyrywanie (maksymalna siła pionowa), osadzonego w drewnie twardej, wynosi 4–7 t (ok. 40–70 kN). Z kolei stosunek maksymalnego nacisku σ_g na drewno podkładu do siły bocznej Q_w , działającej od podkładki na wkręt $\sigma_g = 0,0420 Q_w \text{ [kg/cm}^2\text{]}$, lub $\sigma_g = 0,0041202 Q_w \text{ [MPa]}$, czyli maksymalna siła Q_{max} , którą może przenieść jeden wkręt limitowana jest wartością dopuszczalnego nacisku wzdłuż włókien podkładu drewnianego σ_{gdop} , który [1] przyjęto na poziomie 53 MPa, a więc $Q_{max} = 53/0,0041202 = 12863,5 \text{ N}$ (1,3 t). Otrzymana wartość uświadamia, jak duże znaczenie dla stateczności szyny ma pojedynczy wkręt.

Analiza wyników i wnioski wynikające z badań, obliczeń i analizy materiału dowodowego

W świetle obowiązujących na kolei przepisów, wykręcenie tak dużej liczby wkrętów mocujących podkładki podszynowe do podkładów jednoznacznie kwalifikuje obydwa tory jako niebezpieczne dla jazdy pociągów, a więc zagrażające wystąpieniem katastrofy kolejowej.

W rzeczywistości znaczna część lub nawet cała siła boczna od obciążenia obrzeżem koła przenoszona jest nie tylko przez wkręty, ale i przez siłę tarcia między podkładką a podkładem, wywołaną siłą nacisku pionowego oraz występujące często krawędzie zagłębienia powstałego na skutek osiadania podkładki. Nie zawsze jednak siła tarcia występuje, gdyż na skutek różnych czynników losowych (nierówności szyn, ruch wężykowy i galopowanie pojazdu) może dojść do sytuacji, gdy chwilowo koło wywiera nacisk wyłącznie siłą poziomą o wartości dochodzącej do wartości maksymalnej siły pionowej [8], zagłębienia z kolei nie zawsze występują. W związku z wykonywaniem przez pojazd ruchu złożonego (podstawowy ruch postępowy oraz ruchy szkodliwe, jak wężykowanie i galopowanie), nie można wykluczyć sytuacji chwilowego występowania znacznych sił bocznych również na odcinku prostym. Przy ograniczonej liczbie danych dotyczących dokładnej liczby i rozmieszczenia skradzionych wkrętów oraz konstrukcji opisywanego odcinka, nie ma możliwości przeprowadzenia dokładnych obliczeń zmniejszenia stateczności toru. Wyniki przeprowadzonych obliczeń, przy uproszczonym założeniu braku wkrętów w jednej szynie, można w pewnym stopniu rozszerzyć na przypadek szyny z pozostawioną niewielką, nieregularnie rozmieszczoną liczbą pojedynczych wkrętów. Wskazują one na brak stabilności szyny w takim przypadku.

W wyniku analizy przepisów bezpieczeństwa obowiązujących na kolei i danych z literatury, popartej obliczeniami, stwierdzono występowanie zagrożenia bezpieczeństwa ruchu kolejowego na odcinku toru w rozpatrywanym przypadku, co w efekcie potwierdza istnienie warunków do wykolejenia pociągu.

Podsumowanie

Oslabione mocowanie szyn nie musi powodować natychmiastowej katastrofy (ruch pociągów w rozpatrywanym przypadku odbywał się nadal aż do wykrycia kradzieży), powoduje jednak zwiększone obciążenia pozostałych wkrętów, co w odpowiednio długim czasie, w zależności od obciążenia i natężenia ruchu, prowadzi do nieuchronnej degradacji przytwierdzeń. Brak wkrętów jest znacznie bardziej niebezpieczny w torze bezстыkowy, gdzie oprócz sił związanych z ruchem pociągów (siły od przesuwania i wywracania szyny są składową boczną nacisku koła na główkę szyny), muszą one przenieść siły związane ze skłonnością szyny do wyboczenia pod wpływem wzdłużnych naprężeń ściskających, wywołanych rozszerzalnością cieplną powyżej temperatury neutralnej. Należy przy tym zwrócić uwagę, że kradzież miała miejsce w maju, a więc w porze roku, w której średnia temperatura dobową jest zbliżona do neutralnej ($15 \div 30^\circ\text{C}$), a niedługo potem zaczyna się zwiększać, a wraz z nią zwiększają się cieplne naprężenia ściskające w szynach.



Literatura

- [1] Ciszewski A., Radomski T.: *Materiały konstrukcyjne w budowie maszyn*. PWN, Warszawa 1989.
- [2] Czyczyła W.: *Tor bezстыkowy*. Politechnika Krakowska, Kraków 2002.
- [3] D1 *Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych*. Załącznik do Uchwały nr 155 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z 6 czerwca 2002r.
- [4] Gontarz A., Łukasik K., Pater Z., Weroński W.S.: *Technologia kształtowania i modelowanie nowego procesu wytwarzania wkrętów szynowych*. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003.
- [5] D75 *Instrukcja o dokonywaniu pomiarów, badań i oceny stanu torów*. Zarządzenie Dyrektora Generalnego PKP z 1991.03.05.
- [6] Jakubowicz A., Orłoś. Z.: *Wytrzymałość materiałów*. WNT, Warszawa 1984.
- [7] Koczorowski A.: *Obliczanie nawierzchni kolejowej*. Wydawnictwa Komunikacyjne, Warszawa 1956.
- [8] Koczorowski A., Krepski A.: *Budowa i utrzymanie dróg kolejowych t. I i II*. WKiŁ, Warszawa 1965.
- [9] Lewiński A., Ukleja P.: *Sterowanie ruchem kolejowym na liniach regionalnych*. Dział Logistyka – nauka, Logistyka 3/2012, s. 1325–1328.
- [10] D1 *Przepisy techniczne utrzymania i eksploatacji nawierzchni na liniach kolejowych normalnotorowych użytku publicznego*. Zarządzenie Ministra Komunikacji z 1982.06.01.
- [11] Romaniszyn Z., Oramus Z., Nowakowski K.: *Podwozia trakcyjnych pojazdów szynowych*. WKiŁ, Warszawa 1989.
- [12] Szkoła M.: *Analiza niezawodności kolejowej systemów ze zmienną szerokością torów 1435/1520 mm*. Jakość, bezpieczeństwo i ekologia w transporcie, QSET2011, Kraków – Niepołomice 2011, s. 447–456.
- [13] Wachnik R., Drzewiecki A.: *System zarządzania utrzymaniem pojazdów kolejowych (MMS)*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1861, seria Transport z. 73, Gliwice 2011, s. 115–123.
- [14] PN-EN 13674-1:2011 *Kolejnictwo-Tor-Szyna*. Część 1: Szyny kolejowe Vignole'a o masie 46 kg/m i większej.
- [15] PN-H-84027-07:1984 *Stal dla kolejnictwa, Szyny normalnotorowe, Gatunki*.
- [16] PN-K-80021:1989 *Nawierzchnia kolejowa, Wkręty z łbem prostokątnym*.
- [17] PN-K-80030:1989 *Nawierzchnia kolejowa, Śruby i wkręty, Wymagania i badania*.

mgr inż. Jacek Caban – Politechnika Lubelska
dr inż. Leszek Gardyński – Politechnika Lubelska