

Sławomir GRULKOWSKI*
Politechnika Gdańska

KONCEPCJA OKREŚLANIA CHARAKTERYSTYK MECHANICZNYCH TORU BEZSTYKOWEGO PODCZAS PROCESU REGULACJI GEOMETRYCZNEJ

Streszczenie. W referacie zaprezentowano koncepcję wyznaczania sił osiowych występujących w szynach toru bezstykowego oraz możliwości oceny oporów podsypki. Omówiono możliwości wykorzystania i oprzyrządowania podbijarki torowej dla pomiarów charakterystyk toru. Przedstawiono wyniki badań toru z użyciem maszyn torowych wykorzystywanych w bieżącym utrzymaniu toru.

CONCEPT FOR DETERMINATION OF CWR TRACK MECHANICAL CHARACTERISTICS DURING RECTIFICATION OF TRACK GEOMETRY

Summary. The paper presents concept for determination of basic mechanical characteristics of CWR track. In particular axial forces in rails as well as ballast resistance are taken into account. The possibilities of use or application of tamping machine for measurement of track characteristics have been described. The results of track measurements made with track machines have been presented.

1. Wstęp

Rozwój transportu szynowego idzie w kierunku zwiększania prędkości w ruchu pasażerskim do ponad 300 km/h, a w ruchu towarowym powyżej 120 km/h przy naciskach na oś rzędu 250 kN. Musi to prowadzić do opracowania nowych koncepcji utrzymania i diagnozowania toru bezstykowego oraz oceny znaczenia poszczególnych czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Współczesne trendy w eksploatacji kładą szczególnie nacisk na możliwość kontroli stanu obiektu, wykonywanej w czasie systematycznych

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Władysław Koc, prof. nadzw. Politechniki Gdańskiej

czynności utrzymaniowych. Sprowadza się to m. in. do praktycznego wykorzystania maszyn biorących udział w naprawach toru (np. podbijarek torowych) do oceny sił podłużnych w szynach, do oceny stanu podsypki, określenia oporów poprzecznych i podłużnych podsypki [11]. Należy zaznaczyć, że zarówno problem wpływu oporu poprzecznego podsypki na stateczność toru, jak też kwestia określania wartości naprężeń w torach bezстыkowych wciąż pozostają nie do końca rozwiązane [7, 12].

2. Ogólna charakterystyka sił podłużnych i oporów poprzecznych w torze

Liczne badania oraz doświadczenie utrzymania nawierzchni wskazują na trzy podstawowe elementy stateczności toru: sztywność ramy torowej, opory podsypki przeciwdziałające poprzecznemu przesunięciu ramy toru oraz powstałe nierówności geometryczne toru. Najważniejszym zagadnieniem są tutaj opory poprzeczne podsypki. O wszystkim decydują jednak występujące w szynach siły osiowe od temperatury [3, 14].

2.1. Charakterystyka sposobów określania sił podłużnych

Siły podłużne w torze bezстыkowym wpływają na całość pracy konstrukcji. Zbyt duże siły, spowodowane najczęściej złym utrzymaniem toru, w skrajnych przypadkach prowadzą do wyboczeń. Nie istnieje jednak jednoznaczny, bezpośredni sposób określania naprężeń w eksploatowanym torze bezстыkowym. W wielu ośrodkach badawczych i zarządach kolejowych podejmowano próby nad różnymi metodami pomiaru: 1) pomiary za pomocą tensometrów mechaniczno-optycznych i ekstensometrów, 2) ocena sił podłużnych na podstawie analizy podnoszenia toru (wagon VNTSC); 3) ocena za pomocą pomiaru drgań odcinka szyny (prędkość fali zależna od wielkości naprężenia); 4) metody Railscan i Railtest (zależności pomiędzy własnościami magnetycznymi stali szynowej a naprężeniami); 5) ocena na podstawie pomiaru szumu Barkhausena lub dyfrakcji promieni Roentgena; 6) metody ultradźwiękowe wykorzystujące nieliniowość własności sprężystych stali [3, 8].

2.2. Charakterystyka pomiarów oporów poprzecznych podsypki

Badania oporów bocznych podsypki były na bieżąco przeprowadzane przez ośrodki naukowe i zarządy kolejowe. Analizowano wpływ poszczególnych operacji technologicznych

utrzymania nawierzchni na zmianę zagęszczenia podsypki lub jej rozmieszczenia w torze. Roboty nawierzchniowe oddziałujące na warstwę podsypki, np. oczyszczanie podsypki i regulacja geometryczna położenia toru połączona z podbiciem, powoduje zmniejszenie oporów bocznych toru nawet o 40% [4, 5, 6, 13, 14]. Ciągłe brakuje jednak metody bieżącego pomiaru oporów poprzecznych, a co za tym idzie stanu podsypki określanego wskaźnikowo.

3. Przebieg badań

Badania w torze kolejowym przeprowadzono w ramach projektu badawczego KBN nr 7 T07E 05808 pt. „Analiza sił osiowych w szynach toru kolejowego”. Polegały na pionowym i poziomym przemieszczaniu rusztu torowego, przy zmiennych wartościach sił rozciągających P w tokach szynowych (w zakresie $0 + 500$ kN). Technologia utrzymania nawierzchni nie pozwala na pracę w większym zakresie sił ściskających w szynach (wysoka temperatura). Do naprężania obydwu toków stosowano naprężacze szynowe, natomiast przemieszczenia toru wymuszano za pomocą podbijarki w czasie bieżącej pracy maszyny. Rejestrowano sygnały: siły poprzecznej, siły osiowej w szynie oraz przemieszczenia poziomego. Przeprowadzono również, w ograniczonym zakresie, pomiary przy pionowym podnoszeniu toru.

Zastosowany sposób prowadzenia pomiarów sił i przemieszczeń toru kolejowego omówiono szczegółowo w pracy [1]. Program badawczy zakładał pomiary sił generowanych przez układy podnosząco-nasuujące maszyn torowych. Możliwe są tutaj dwa sposoby pomiaru. Pierwszy wymaga montażu siłomierzy w układach podnoszących, a drugi wykorzystuje w charakterze elementów pomiarowych czujniki montowane na tłoczyskach siłowników hydraulicznych. W realizowanym projekcie badawczym wybrano wariant drugi. Głowice czujników są instalowane na tłoczyskach (poziomym i pionowym) maszyny torowej. Tłoczyska siłowników w podbijarce mają kształt walcowy, a więc czujniki do pomiaru sił poprzecznych musiały mieć budowę głowicy walcowej montowanej na tłoczyskach siłownika. Najważniejszym elementem tej głowicy są czujniki indukcyjne.

Przemieszczenia poprzeczne wyznaczano mierząc strzałki ugięcia toku szynowego względem układu odniesienia związanego z ramą maszyny torowej. W realizowanym projekcie badawczym zastosowano metodę dotykową ze względu na mniejsze koszty czujnika. Sposób ten wymagał zamontowania na końcówce trzpienia dotykowego rolki ślizgowej jako sprzęgu ślizgającego się po szynie. Do pomiaru sił w szynie, oprócz czujnika o

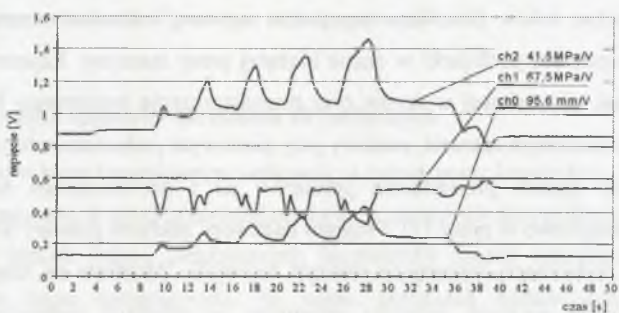
konstrukcji walcowej, zastosowano również czujnik o konstrukcji liniowej, umożliwiającą montaż na powierzchniach lokalnie płaskich (jak np. szyjka szyny) [2, 10].

4. Wyniki przeprowadzonych badań

4.1. Uwagi wprowadzające

Na rysunku 1 pokazano przykładowe przebiegi czasowe pomierzonych sygnałów przemieszczenia poziomego y , siły poprzecznej Y oraz siły osiowej S w szynie. Z punktu widzenia oceny przydatności podbijarki jako urządzenia diagnostycznego celowe będzie przeanalizowanie sygnałów:

- siły poprzecznej Y (do określania oporów poprzecznych podsypki);
- siły osiowej S (do wyznaczania sił podłużnych w szynie).



Rys. 1. Przebiegi czasowe sygnałów: przemieszczenia poziomego szyny y (ch0), siły poprzecznej Y w siłowniku hydraulicznym (ch1) oraz siły podłużnej S w szynie (ch2) podczas pracy podbijarki przy początkowej podłużnej sile rozciągającej $P = 500$ kN

Fig. 1. Signals time characteristics of the horizontal displacement y of the rail (ch0), the lateral force Y in the hydraulic servo (ch1), and the longitudinal force S in the rail (ch2) during the operation of the tamping machine at pull $P = 500$ kN

4.2. Analiza sygnału siły poprzecznej

Z uzyskanych przebiegów czasowych sygnału siły poprzecznej Y wynika, że siłownik poziomy w podbijarce działa w sposób impulsowy. Siła osiowa narasta w nim stopniowo do momentu, w którym opór podsypki jest tak duży, że nie pozwala na przemieszczanie ramy. Wówczas następuje spadek wartości siły w tłoczysku i ponowne jej narastanie aż do pokonania oporów. Kolejne etapy pokonywania oporów podsypki następują tak długo, aż

osiągnięta zostanie zadana wartość nasunięcia ramy toru. Siła Y w siłowniku wówczas również osiąga maksimum. Gdy siła spada do zera, tor cofa się w kierunku pierwotnego położenia aż do osiągnięcia nowego położenia równowagi. Spowodowane jest to sprężystością konstrukcji rusztu torowego oraz naprężeniami w szynach. Wówczas w układzie podbijająco-nasuującym w podbijarce stosuje się funkcję automatyki wybiegu, dzięki której tor dopychany jest na wymagane położenie. Czas osiągnięcia zadanego przemieszczenia jest zmienny, charakter zaś pracy siłownika - bardzo zróżnicowany. Próby analizy siły poprzecznej Y w stosunku do osiąganego przemieszczenia y w określonym czasie nie przyniosły niestety do tej pory zadowalających i spodziewanych rezultatów. Wyniki analizy okazały się bardzo nieregularne przy różnych siłach osiowych P (rysunek 2). Taki stan trudno interpretować niejednorodnością podsypki i jej oporu w przekroju poprzecznym. Pierwsze obserwacje wskazują na nieregularny charakter pracy siłownika poprzecznego. Starano się więc wyeliminować impulsowy sposób pracy. Można zauważyć, że tylko pierwsza faza pracy odbywa się całkowicie w otoczeniu nienaruszonej podsypki i bez działań impulsowych. Próba interpretacji pierwszych faz pracy podbijarki przy różnych siłach osiowych naciągu szyny P pozwoliła zauważyć pewną nie do końca zbadaną jeszcze zależność maksymalnych przesunięć od generowanych sił.

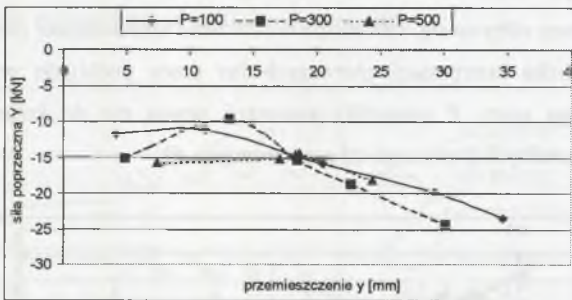


Rys. 2. Wykres zależności siły poprzecznej Y w siłowniku podbijarki torowej od przemieszczenia y w pierwszym etapie nasuwania toru przy różnych siłach osiowych P

Fig. 2. The lateral force Y in the hydraulic servo of tamping machine versus displacement y at various axial forces P

Nie można jeszcze mówić o jakiegokolwiek tendencji ze względu na bardzo małą liczbę wyników wykorzystanych w analizie, co spowodowane jest stosunkowo długim okresem próbkowania (co 0,33 s). Przy $P=0$ kN i niewielkim przemieszczeniu $y=1$ mm musiała zostać zastosowana siła ponad $Y=10$ kN. Z kolei, przy $P=500$ kN i przemieszczeniu prawie ośmiokrotnie większym $y=7,40$ mm siła poprzeczna $Y=15,7$ kN. Stwierdzono, że

bezwzględna wartość siły Y nie jest czynnikiem decydującym o wielkości uzyskanego przesunięcia y . Przy dużych siłach naciągu P siła Y_{max} może się nawet okazać mniejsza niż dla mniejszych wartości P (w zamian wydłuża się nieco sumaryczny czas działania tej siły). Przy dłuższym czasie działania siły poprzecznej występują przesunięcia skokowe, czemu odpowiadają gwałtowne spadki siły w tłoczysku siłownika hydraulicznego. Przebieg zmian siły Y jest w znacznym stopniu uzależniony od konstrukcji i systemu sterowania układu nasuwającego podbijarki. Okazało się, że przy mniejszych siłach osiowych w szynach przemieszczanie ramy torowej wymaga dużego różnicowania sił w siłownikach w kolejnych fazach nasuwania toru ze względu na duży wpływ oporu poprzecznego podsypki. Przy wzrastających siłach osiowych P w szynach zawęża się zakres sił poprzecznych Y powodujących nasuwanie rusztu torowego. Wpływ oporu staje się w tej sytuacji coraz mniejszy (rysunek 3) [11].



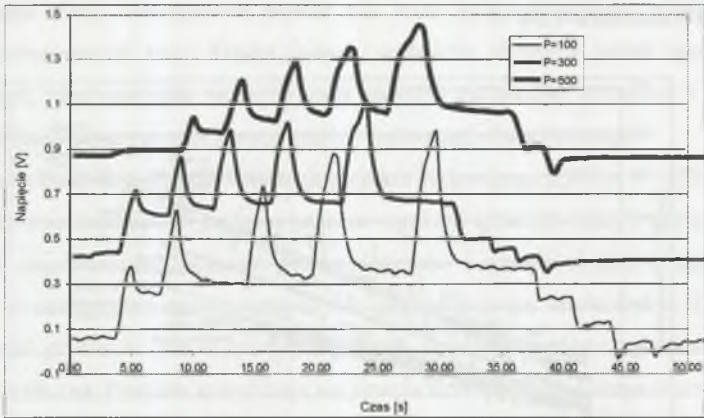
Rys. 3. Wykres maksymalnych sił Y stosownych w poszczególnych etapach nasuwania toru w funkcji jego przesunięcia y

Fig. 3. Maximum forces Y at various stages of track lining as a function of displacement y

4.3. Analiza sygnału siły osiowej w szynie

Podczas pomiarów rejestrowano elementarne przemieszczenia podłużne w strukturze szyny za pomocą czujnika indukcyjnego liniowego. Pozwalało to wyznaczyć wartość siły osiowej wprowadzanej naprężaczem szynowym przed rozpoczęciem poprzecznego przemieszczania toru. Konstrukcja czujnika pozwala przyjąć, iż podczas nasuwania toru uzyskuje się wartości, które można wykorzystać do szacowania krzywizny poziomej. Uzyskana wartość liczbowa ΔS (miernik krzywizny) zależy od konstrukcji czujnika. Wyrażono ją w jednostkach siły, chociaż w rzeczywistości czujnik określa siłę w szynie tylko wtedy, gdy przesunięcie poprzeczne jest równe zero. Na rysunku 4 pokazano

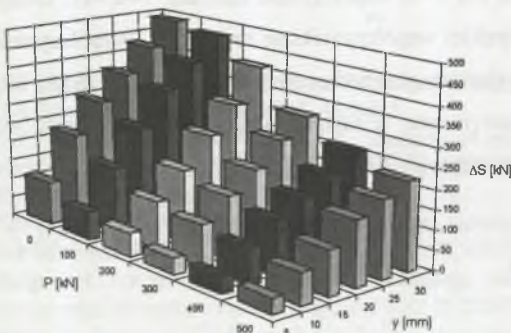
przykładowe przebiegi czasowe sygnału ΔS . Okazało się, że w odróżnieniu do sił Y wskaźnik ΔS wykazuje wyraźną zależność od siły P . Potwierdza to jednoznacznie rys. 6, na którym pokazano kształtowanie się zależności funkcji $\Delta S = f(y, P)$ dla wybranych serii pomiarowych.



Rys. 4. Przykładowe przebiegi czasowe sygnału wskaźnika ΔS [41,5 MPa/V] dla różnych wartości siły osiowej P w szynie

Fig. 4. Examples of time characteristics for the signal of index ΔS [41,5 MPa/V] for various axial forces P in rail

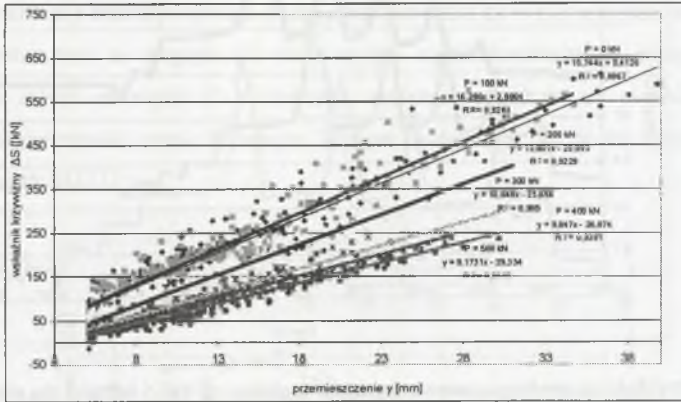
Diagramy na rys. 5 wskazują na wyraźną zależność wskaźnika ΔS od siły osiowej P występującej w szynie przed rozpoczęciem nasuwania toru.



Rys. 5. Wrażliwość czujnika liniowego ΔS w funkcji siły osiowej P w szynie i przemieszczenia poprzecznego y

Fig. 5. Sensitivity of the linear sensor ΔS in function of axial force P in rail and lateral displacement y

Jak widać, wraz ze wzrostem tej siły maleje miernik krzywizny ΔS . Wynika stąd wniosek, że rejestracja krzywizny, przy określonej wartości przemieszczenia poprzecznego y , może stanowić podstawę do wyznaczania siły osiowej w szynie. To interesujące spostrzeżenie zostało w pełni potwierdzone w toku dalszej, bardziej szczegółowej analizy. Zbadano istnienie korelacji pomiędzy pomierzonymi wartościami wskaźnika ΔS i przemieszczenia y przy różnych wartościach siły P .



Rys. 6. Wykresy prostych regresji $\Delta S = f(y)$ przy różnych wartościach siły osiowej P w szynie
Fig. 6. Diagrams of regression lines $\Delta S = f(y)$ for various axial force values in rail

Uwzględniono wszystkie wyniki pomiarowe, uzyskane przy $y \geq 5$ mm. Rezultaty przeprowadzonej analizy przedstawia rysunek 6. Istotność korelacji nie ulega wątpliwości. W najgorszym przypadku, dla $P=0$, współczynnik korelacji $r=0,947$. Otrzymane proste regresji różnią się przede wszystkim współczynnikiem nachylenia. Współczynnik ten maleje wraz ze wzrostem siły P (z wyjątkiem przypadku $P=100$ kN, ale tutaj mogły odgrywać rolę warunki przeprowadzenia eksperymentu, w temperaturze około 0°C i straty wprowadzanej siły na pokonanie oporu podłużnego) [9, 10].

5. Podsumowanie

Z dotychczasowych doświadczeń można stwierdzić, iż jest możliwe wnioskowanie na temat siły podłużnej w szynach na podstawie pomiaru krzywizny przy różnych wartościach przemieszczenia poprzecznego. Wymaga to jednak dalszych badań terenowych oraz stosowania odpowiedniego czujnika do pomiaru krzywizny, instalowanego do ramy

podbijarki. W omawianych badaniach krzywiznę szacowano bowiem w sposób pośredni (czujnikiem liniowym do pomiaru siły), co niewątpliwie miało wpływ na uzyskiwaną dokładność.

Uzyskano też pewne przesłanki dla wykorzystania siły poprzecznej w siłowniku podbijarki do określenia występującego oporu bocznego podsypki (będącego funkcją stanu ustabilizowania toru). Niewątpliwie pomiar taki musi być wykonywany przed procesem regulacji geometrycznej toru. Trzeba jednak w trakcie dalszych badań lepiej poznać charakterystyki eksploatacyjne maszyny oraz określić najbardziej korzystny i wymierny sposób sterowania przez operatora pracą zespołu podnosząco-nasuującego.

W tym też celu trwa realizacja kolejnego projektu badawczego KBN nr 8 T07E 027 21 pt. „Diagnostyka toru kolejowego podczas procesu regulacji geometrycznej”, gdzie prace nad powyższymi zagadnieniami znacznie uszczegółowiono i sprecyzowano, a zakres badań poszerzono o analizę numeryczną problemów, gdyż klasyczna teoria belek II rzędu nie spełnia założeń problemu; jest to specyficzny ustrój, w którym podczas zginania występuje osiowa siła podłużna. Problem komplikuje się jeszcze bardziej, kiedy siła podłużna w szynie istnieje już w stanie wyjściowym i nie jest też obojętne, czy jest to siła ściskająca czy rozciągająca. Niedostatki istniejących programów komputerowych wykorzystujących aplikacje MES doprowadziły do opracowania specjalnego oprogramowania analizującego wielkości sił osiowych w zginanej szynie [15].

LITERATURA

1. Barylski A., Koc W., Wilk A.: Longitudinal forces in railway track and tamping machine shifting sets, *NDT&E International*, 32(8), 1999, 445-455.
2. Barylski A., Koc W., Kuć K., Szymczak C., Wilk A.: Badanie sił osiowych w szynie przy wymuszonych przemieszczeniach poprzecznych, (Materiały) IX Konferencja Naukowa "Drogi Kolejowe", Kraków – Kościelisko 1997, 33-44.
3. Czyczuła W., Towpik K.: Problemy modelowania oraz identyfikacji modeli toru bezстыkowego, *Problemy Kolejnictwa*, nr 128, Warszawa 1998, 67-97.
4. Improved knowledge of forces in CWR track (including switches). Lateral and longitudinal resistance measurements: synthesis report. *ERRI D 202/RP 7*, Utrecht 1999.
5. Improved knowledge of forces in CWR track (including switches). Lateral Resistance Tests. *ERRI D 202/DT 360*, Utrecht 1997.
6. Improved knowledge of forces in CWR track (including switches). Measurement of lateral resistance characteristics for ballasted track. *ERRI D 202/DT 361*, Utrecht 1998.

7. Koc W.: Określanie wartości naprężeń w torach bezстыkowych, Zeszyty Nauk-Techn. Oddziału SITK w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne 41(84), Kraków 2000, 139-155.
8. Koc W.: Przegląd prac badawczych nad określaniem sił podłużnych w szynach toru bezстыkowego, (Materiały) Czwarte Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Szynowych, Gdańsk 2002, 39-58.
9. Koc W., Wilk A., Grulkowski S.: Możliwości wykorzystania pracy podbijarki w diagnostyce toru kolejowego, (Materiały) Drugie Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Kolejowej, Gdańsk – Sycowa Huta 2000, 59-69.
10. Koc W., Wilk A., Grulkowski S.: Prospects for a tamping machine application in the railway track diagnostics, 4th International Conference „Railway Engineering 2001”, London, UK, 30th April – 1st May 2001, [CD-ROM].
11. Koc W., Wilk A., Grulkowski S.: Rola podbijarki torowej przy określaniu oporów poprzecznych podsypki, (Materiały) Trzecie Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Szynowych, Gdańsk 2001, 69-74.
12. Samavedam G., Kish A.: Continuous welded rail track buckling safety assurance through field measurements of track resistance and rail force, Transportation Research Record, nr 1289, 1995.
13. Towpik K.: Badania toru bezстыkowego dla potrzeb Międzynarodowego Związku Kolejowego (UIC), (Materiały) Symposium Naukowo-Techniczne „Budowa i utrzymanie toru bezстыkowego”, Kraków – Zakopane 1996, 115-121.
14. Towpik K.: Utrzymanie nawierzchni kolejowej, WKŁ, Warszawa 1990, 129-133.
15. Wilk A., Koc W., Dobrowolski P., Grulkowski S.: Numerical analysis of the rail mechanics in the process of adjustment of track level, 5th International Conference „Railway Engineering – 2002”, London, UK, 3rd – 4th July 2002, [CD-ROM].

Recenzent: Dr hab. inż. Włodzimierz Czyczula, prof. Politechniki Krakowskiej

Abstract

The results of the researches and analyses which had been obtained within the confines of the KBN (Scientific Research Committee) research project no. 7 T07E 05808 – „The Analysis of axial strengths in railway track rails” motivated the interdisciplinary research team of the Technical University of Gdansk to make use of a tamping machine in surface’s diagnosis and most importantly – to define the axial strengths in rails as a result of the track distortion set (curvature). The secondary effect of the researches and measurements was a problem of ballast section condition assessment (especially its lateral resistance), estimated as a result of the transverse clearance of the railway track. This experiment – with the use of the original measurement apparatuses - and subsequent detailed analysis confirmed the direct relation between curvature arising during lining of the track process and the strengths in rails. It leads up to the conclusion that there is a need to construct special apparatuses which would be installed on a tamping machine and would create numerical datas for analysis.