

LESIAK Piotr¹
PODSIADŁO Rafał²

Symulacyjne badania oddziaływania nalepów kół wagonowych na tor

dynamika pojazdów szynowych,
zestaw kołowy z nalepem
badania symulacyjne

Streszczenie

W pracy dla modelu symulacyjnego wagonu dwuosiowego z zestawem kołowym, na którego jednym z kół znajduje się nalep, zbadano jego dynamiczne oddziaływanie na szynę w funkcji wielkości uszkodzenia, prędkości wagonu i masy dla różnych przypadków sztywności toru. Porównano też względne przyrosty sił dla koła z nalepem i spłaszczeniem. Symulacje wykonano w środowisku UM LOCO.

SIMULATION OF THE DAMAGING IMPACT OF WHEELSET DEFECTS ON THE TRACK

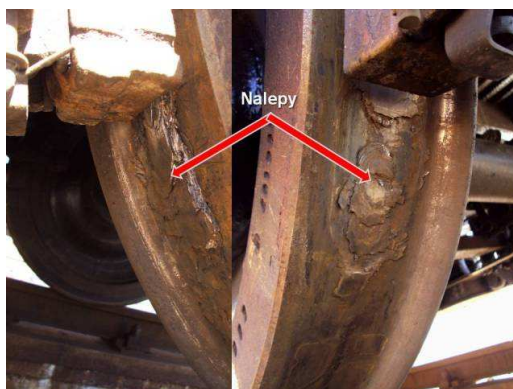
Abstract

In this paper a model of a two-axis rail car with a damaged wheel set has been described. The dynamic relationship between such a configuration and the track, being a function of the damage scale, rail car speed and mass, for different cases of the track rigidity has been analyzed. Relative friction increase for wheel with flatten and accretion (damaged) has been analyzed. The simulation has been performed in the UM LOCO environment.

1. WSTĘP

Główną przyczyną deformacji powierzchni tocznych kół wagonowych są nieprawidłowości funkcjonowania układu hamulcowego pojazdu lub ich nieprawidłowa obsługa. Całkowicie lub częściowo zakleszczony w klockach hamulcowych zestaw kołowy ślizga się po szynie. Objawia się to najczęściej szumem, piskiem, iskrzeniem i dymieniem między klockami hamulcowymi a obręczą lub wieńcem kół monoblokowych oraz między szyną a kołem. Styki kół z szyną nagrzewają się i w tych miejscach materiał powierzchni tocznej uplastycznia się, co znacznie przyspiesza jego ubytek poprzez wygniecenie. Jeśli wygnieciony materiał przyklei się do nie uszkodzonej powierzchni tocznej tuż za stykiem, to po ustaniu poślizgu nawalcuje się na tej powierzchni, która zostanie zniekształcona. Jeśli natomiast przyklei się do szyny, to następnie albo koło zawalcuje go na szynę, albo zabierze na siebie. W obu przypadkach na kole „dającym” materiał wytworzy się spłaszczenie, a na kole „otrzymującym” materiał - nalep. Nalep będzie się powiększać wskutek dowlacowywania się cząstek materiału oderwanych od szczęk hamulcowych w trakcie kolejnych hamowań.

Inną przyczyną może też być niewłaściwe hamowanie lub stosowanie płozy hamulcowej przy rozrządzie wagonów. W tym drugim przypadku, uszkodzeniu ulegnie tylko jedno koło zestawu, gdyż drugie chroni klin. W przypadku hamowania, na obydwu powierzchniach tocznych kół powstaną nalepy, ale najczęściej różnią się one kształtem i rozmiarem, rys. 1. Problemy te dotyczą w szczególności wagonów towarowych.



Rys. 1. Nalepy na powierzchni tocznej kół zestawów kołowych

¹Piotr Lesiak, Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki, 26-600 Radom, ul. Malczewskiego 29, tel: + 48 48 361-77-09, e-mail: p.lesiak@pr.radom.pl

²Rafał Podsiadło, Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29, tel: + 48 48 361-77-48, e-mail: r.podsiadlo@pr.radom.pl

Na poprawę tej sytuacji może mieć wpływ uszczelnienie przewodów hamulcowych, zaworów rozrządnych, cylindrów hamulcowych, głowic przeciwpoślizgowych i innych podzespołów układu pneumatycznego hamulca oraz ujednolicenie współpracy hamulców.

Z punktu widzenia granicznych wymagań eksploatacyjnych, powierzchnia toczna koła nie może wykazywać [8]:

- wgnieceń,
- płaskich miejsc dłuższych niż 60 mm dla kół o średnicy ≥ 630 mm,
- płaskich miejsc dłuższych niż 30 mm dla kół o średnicy < 630 mm,
- nalepów materiałowych o długości większej niż 60 mm lub 1 mm wysokości dla kół o średnicy > 630 mm,
- nalepów materiałowych o długości większej niż 30 mm lub 1 mm wysokości dla kół o średnicy < 630 mm
- rys na przejściu między powierzchnią toczną i powierzchnią czołową,
- uszkodzeń na powierzchni tocznej (wyrwania, dziury, rozwarstwienia) dłuższych niż 60 mm.

Jednak z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacyjnego, ważniejszym parametrem jest siła uderu uszkodzonego koła na szynę, gdyż siła ta wywołuje dodatkowe impulsowe naprężenie w szynie, zagrażające jej pęknięciu. Toteż znane są z eksploatacji przypadki licznych pęknięć szyn, wskutek przejazdu wagonów z uszkodzoną powierzchnią toczną kół i w konsekwencji ich wykolejeń. Dlatego ważne jest wyznaczenie granicznych nadwyżek dynamicznych i ich detekcja przez urządzenia diagnostyczne zainstalowane w torze kolejowym [1], [6].

Dlatego autorzy podjęli się kontynuacji badań symulacyjnych tego problemu, po rozważaniach dotyczących płaskich miejsc, co przedstawiono w pracy [2]. Pomiary tych sił wykonywano też eksperymentalnie w torze kolejowym, a kompendium wiedzy na ten temat przedstawiono w pracach [3], [4], [5].

Dotychczas nie są znane aż tak szerokie badania i analizy uwzględniające jednocześnie szereg różnorodnych czynników. Dlatego dla modelu symulacyjnego zestawu kołowego z nalepem na kole, zbadano jego dynamiczne oddziaływanie na szynę w funkcji wielkości uszkodzenia, prędkości wagonu i jego masy dla różnych przypadków sztywności toru. Porównano też względne przyrosty sił dla koła z nalepem i spłaszczeniem. Symulację wykonano w środowisku UM LOCO [7].

2. MODEL KOŁA Z NALEPEM

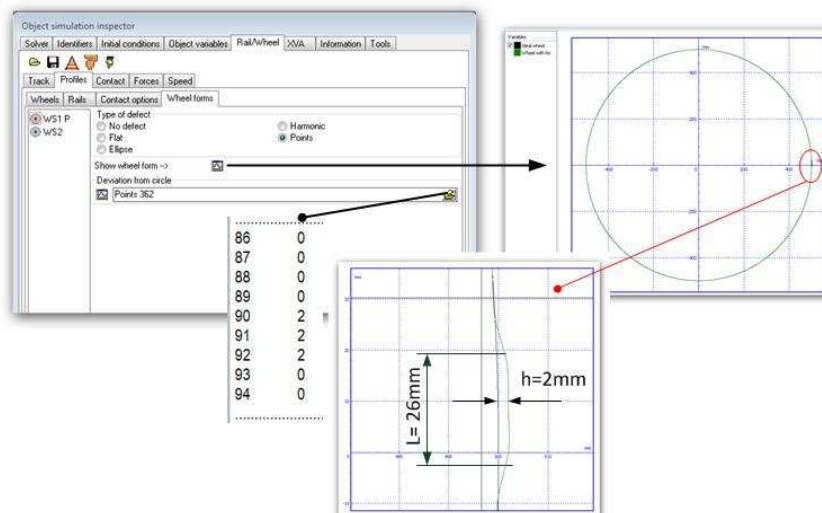
W pracy użyto oprogramowania UNIVERSAL MECHANIZM Loco (UM LOCO) [7], do definicji i symulacji matematycznego modelu wagonu. Program automatycznie generuje równania ruchu wagonu na podstawie danych wejściowych (prędkość, szlak kolejowy, itp.).

Symulacyjny model wagonu składa się z ciał sztywnych, które zostały połączone elementami prowadzącymi oraz podatnymi, tzn. model wagonu stanowi pudło połączone z dwoma zestawami kołowymi. Założono, że zestawy kołowe mają średnicę 1000 [mm] oraz profil S1002 (europejski). Szyny zostały zamodelowane jako idealne (bez zużycia) o profilu UIC60.

Pierwszy stopień usprężynowania wagonu jest złożony z układu czterech sprężyn śrubowych, ośmiu tłumików (czterech pionowych i poprzecznych) oraz czterech prowadników. Szczegóły modelu wagonu przedstawiono w pracy autorów [2].

Natomiast tor kolejowy zachowuje się jak nieskończenie długa belka o podporze sprężystej.

Program UM LOCO dysponuje możliwościami modelowania i symulacji pięciu rodzajów uszkodzeń obręczy zestawu kołowego, co przedstawiono w oknie programu na rys. 2. Uszkodzenia te mogą być zdefiniowane jako: płaskie miejsce, elipsa, odkształcenia harmoniczne i punktowe. W celu wprowadzenia defektu, w oknie programu należy go zaznaczyć - dla przypadku symulacji nalepu użyto funkcji z ang. Points. Można zauważyć, że przy oznaczeniu WS1 (zestaw kołowy nr 1) pojawiła się litera P co oznacza, że jest to zestaw z defektem punktowym czyli w tym przypadku zdefiniowanie nalepu.



Rys. 2. Okno programu UM LOCO do zdefiniowania uszkodzenia obręczy koła zestawu

3. BADANIA SYMULACYJNE KOŁA Z NALEPEM

Tor kolejowy zachowuje się jak nieskończenie długa belka na podporze sprężystej. Chwilowa wartość siły obciążającej szynę w punkcie styku z kołem, jest wynikiem kilku składowych i może być opisana ogólnie jako:

$$Q_i = Q(1 + \alpha_r + \alpha_d) \tag{1}$$

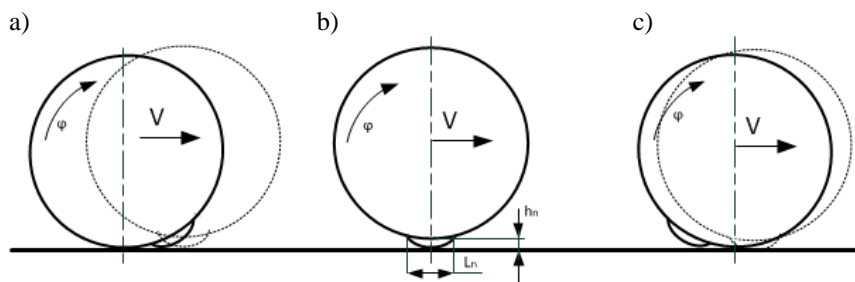
gdzie: Q - statyczny nacisk koła na szynę,

α_r - dynamiczny mnożnik regularny,

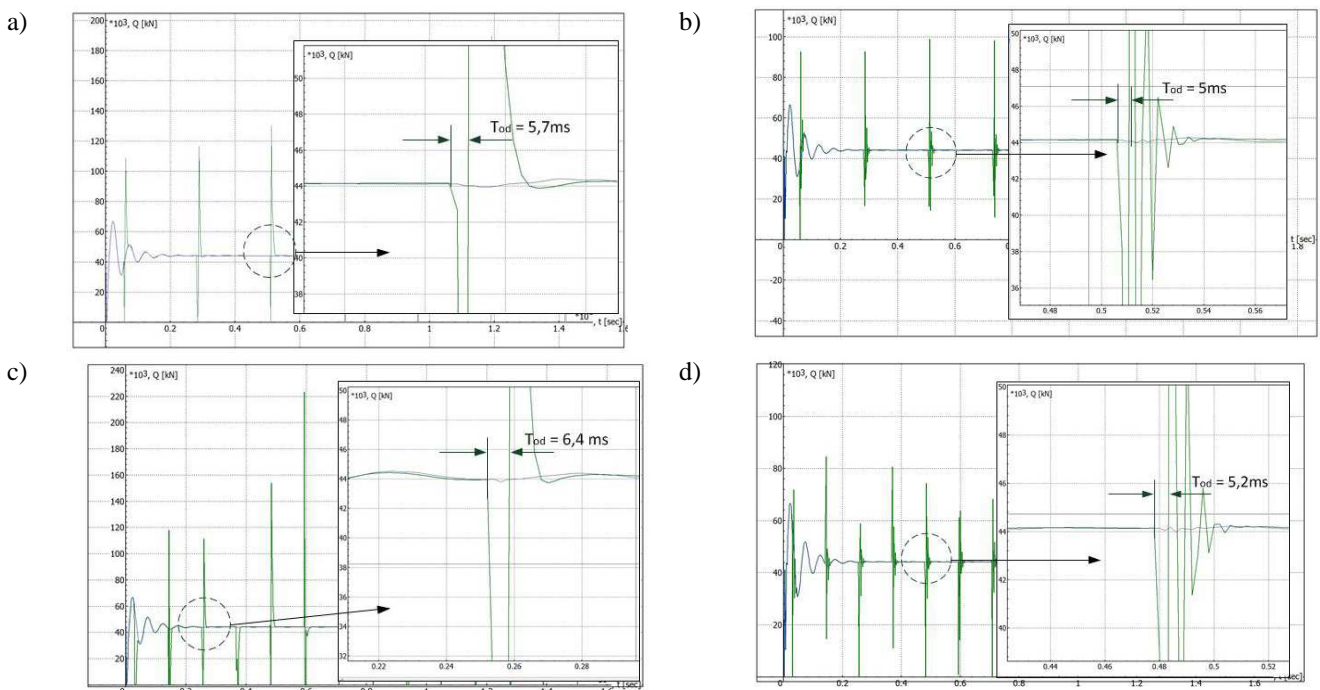
α_d - dynamiczny mnożnik nadzwyczajny.

Mnożnik α_r wskazuje na zmienne obciążenie powstałe wskutek ruchu pojazdu, tj., od siły odśrodkowej o kierunku pionowym, od momentów o zmiennych kierunkach wywołanych przejeżdżającymi kołami oraz oddziaływania nieresorowanej jak i resorowanej masy pojazdu. Mnożnik α_d ujmuje dynamiczne oddziaływanie pochodzące od uszkodzeń powierzchniowych szyn i powierzchni tocznych kół.

Toteż obciążenie w danym punkcie szyny pochodzące od koła z nalepem przejeżdżającego pociągu nieprzerwanie się zmienia. Poszczególne fazy obrotu koła i położenia nalepu, przedstawiono na rys. 3. Dla uszkodzenia o wielkości strzałki $h_n = 2$ mm, masy wagonu pudła wagonu $M_p = 15$ t i prędkości $V = 5$ i 10 km/h, dla toru twardego i miękkiego, szczegóły zmian generowanych sił przedstawiono na rys. 4. I tak, w pierwszej fazie koło najjeżdża na nalep, rys. 3a, i od momentu osiągnięcia szczytowego punktu, rys. 3b, następuje odciążenie szyny – czas trwania T_{od} pierwszego impulsu ujemnego na przebiegach z rys. 4. W momencie uderu obręczy koła w szynę wystąpi maksimum impulsu siły dodatniej (silne jej dociążenie). Amplitudę tego impulsu w obliczeniach przedstawionych na rys. 6 i 7. Dalsze zmiany siły uzależnione są od sztywności toru.



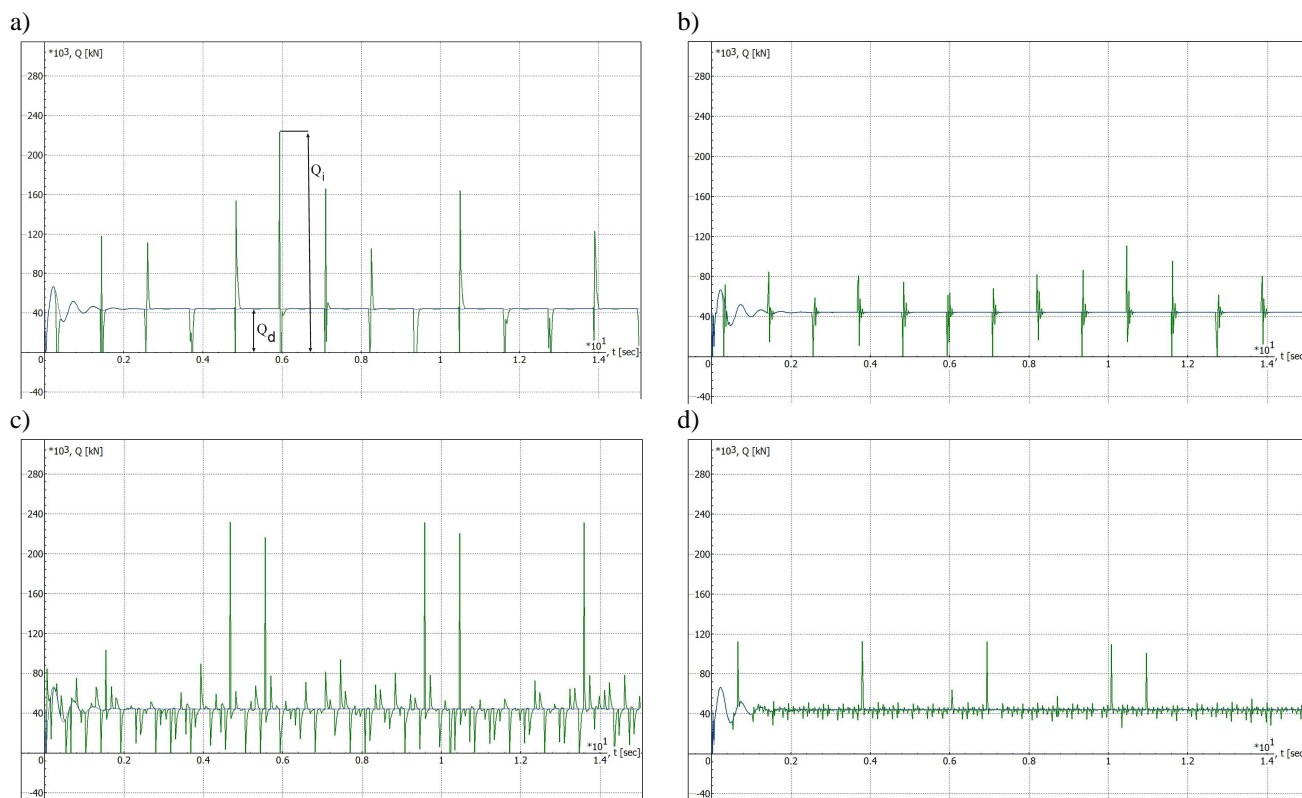
Rys. 3. Fazy ruchu koła z nalepem: a) najazd koła na nalep, b) graniczny punkt, od którego następuje odciążenie szyny, c) uder koła w szynę i dociążenie



Rys. 4. Szczegóły zmian siły oddziaływania koła z nalepem na szynę, dla $h_n = 2$ mm, $M_p = 15$ ton: a) i b) $V = 5$ km/h, c) i d) $V = 10$ km/h odpowiednio dla torów twardego a) i c) miękkiego b) i d)

Dla toru twardego szybko następuje stabilizacja siły na poziomie dynamicznego oddziaływania koła bez uszkodzenia, rys. 4a i c. Natomiast tor miękki poddaje się sile udaru i wykonuje dalsze tłumione drgania, rys. 4b i d. Pokazany na rys. 4 czas odciążenia T_{od} jest złożoną funkcją parametrów dynamicznych pojazdu szynowego jego obciążenia, prędkości a także istotnie zależy od sztywności toru. Dla niezmiennych pozostałych parametrów jest większy dla toru twardego (porównać rys. 4, a z b i rys. 4c z d).

Przykładowe przebiegi sił oddziaływujących na szynę dla różnych prędkości pojazdu i sztywności toru, przy stałych wielkościach uszkodzenia i masy wagonu, przedstawiono na rys. 5, gdzie jako amplitudę siły dociążenia oznaczono Q_i a amplitudę dynamicznego oddziaływania koła na szynę, Q_d . Przy wyższej prędkości $V = 90$ km/h, występują dodatkowe siły odciążenia i dociążenia o wielokrotnie mniejszej amplitudzie od wartości ekstremalnych. Siły te są korzystnie tłumione w torze miękkim. Ponadto udary następują przy tej prędkości szczególnie nieregularnie, co świadczy, że wskutek wzajemnego oddziaływania koła i szyny, ich wzajemna nie synchronizowana interakcja powoduje tłumienie tych niekorzystnych zjawisk. Na początku procesu symulacji występują silne fluktuacje obciążenia, rys. 4 i 5, spowodowane dynamiką ruszającego z miejsca wagonu, dlatego próbki sił uwzględnianych w obliczeniach, powinny być pobierane poza tą przejściową fazą.

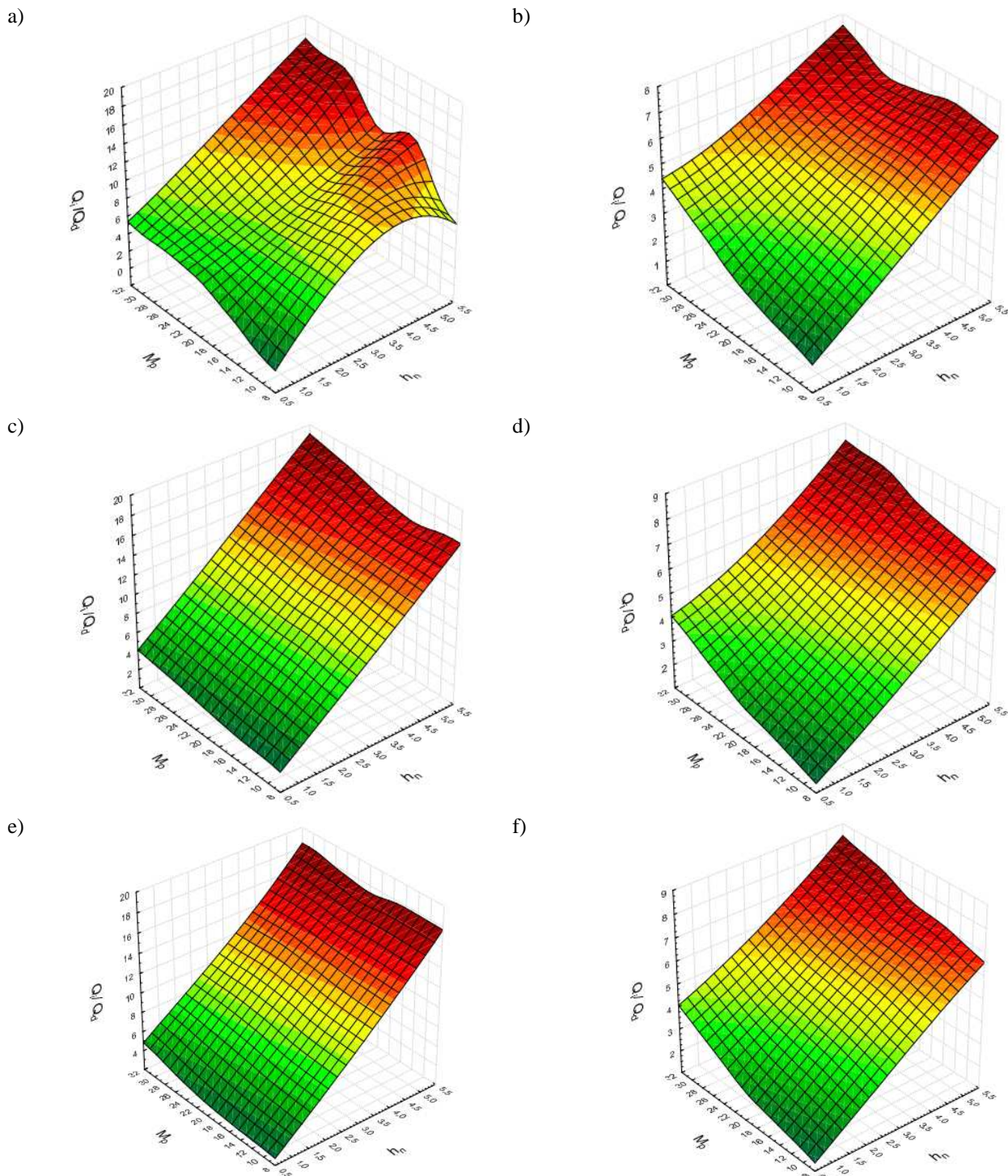


Rys. 5. Ilustracja sił oddziaływania koła z nalepem na szynę dla masy wagonu $M_p = 15$ t przy $V = 10$ km/h: a) tor twardy, b) tor miękki i przy $V = 90$ km/h c) tor twardy, d) tor miękki, gdzie Q_i - siła dynamiczna przekazywana na szynę przez koło z nalepem o wysokości $h_n = 2$ mm, Q_d - siła dynamiczna przekazywana na szynę przez koło bez defektu

Badania symulacyjne wykonano przy następujących założeniach:

- tor prosty idealny $R = \infty$ m (szyny zamodelowano jako elementy nieużyte),
- rozpatrzono dwa rodzaje tłumienia i sztywności toru - tor twardego (parametry $k_p = 8,5 \cdot 10^7$ N/m i $c_p = 3,8 \cdot 10^4$ Ns/m) oraz miękki (parametry $k_p = 3 \cdot 10^7$ N/m i $c_p = 2,2 \cdot 10^4$ Ns/m) [3],
- zamodelowano nalep na kołach zestawu (w zakresie wysokości jego strzałki $h = 1, 2 \dots 5$ mm – znacznie powyżej dopuszczalnej wartości, celem analizy krytycznych zjawisk) przy założeniu że jego długość wynosi około $L_n = 26$ mm ,
- prędkości wagonu $V = 10, 30, 50, 70, 90, 110$ km/h
- masy pudła wagonu wynosiły $M_p = 10$ t, 15 t, 20 t, 25 t, 30 t.

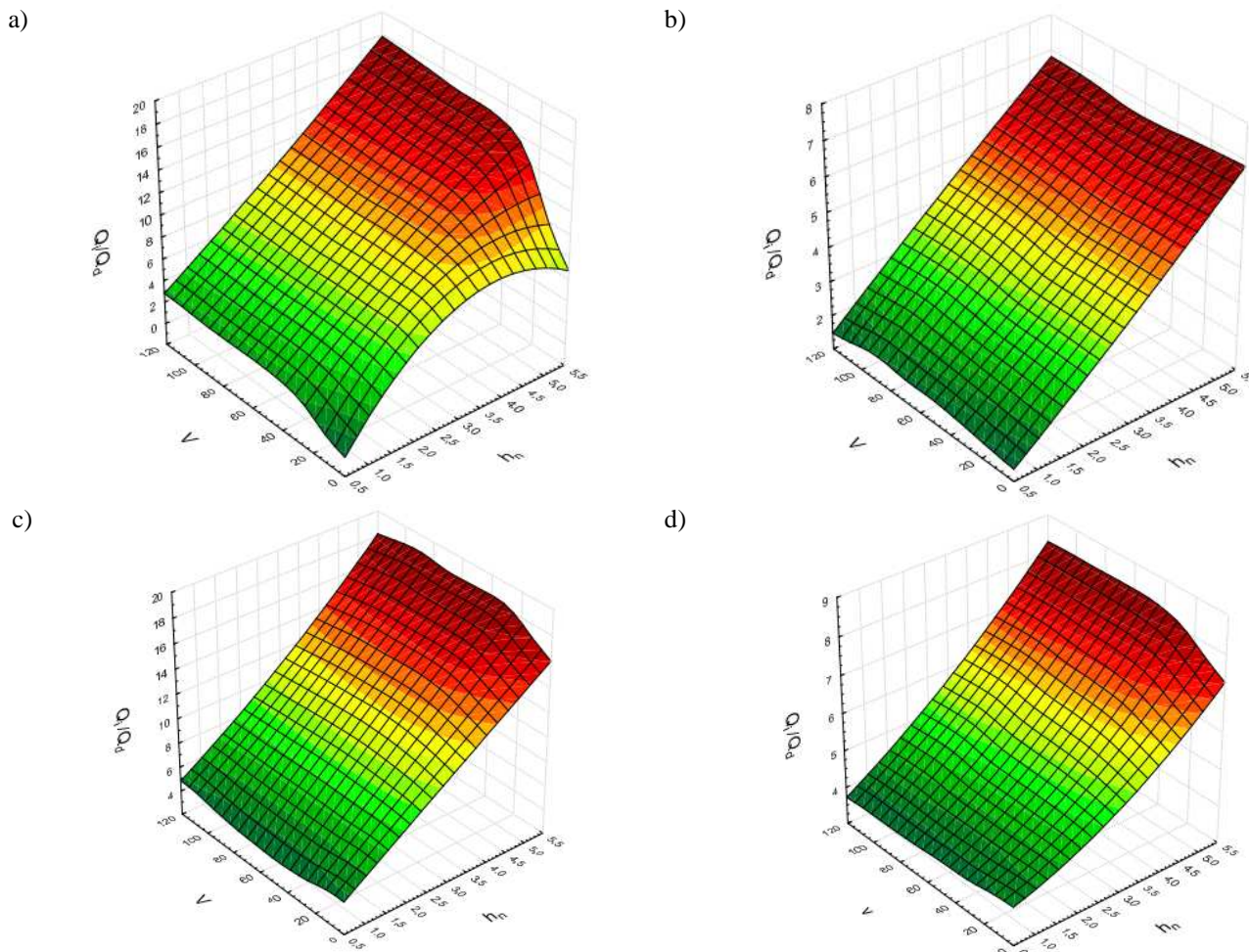
Dla tych parametrów przedmiotem badań było wyznaczenie wzajemnych relacji funkcyjnych między wzajemnym stosunkiem sił Q_i/Q_d od wielkości nalepu h_n i masy pudła pojazdu M_p , przy stałych prędkościach V , dla dwóch sztywności toru, rys. 6. Wyniki badań uzyskano z symulacji dynamicznej wagonu w środowisku UM Loco. Z analizy wynika quasi proporcjonalność przyrostu stosunku tych sił w funkcji wzrostu strzałki nalepu, przy czym co jest oczywiste, wzrost ten jest szczególnie intensywny dla toru twardego. Większa regularność występuje tu dla prędkości przekraczających $V > 30$ km/h.



Rys. 6. Funkcje zależności stosunku sił Q_d/Q_s od wielkości nalepu h_n i masy pudła wagonu M_p , przy różnej sztywności toru: a) i b) przy $V = 10$ km/h odpowiednio dla toru twardego i miękkiego, takiego jak dla c) i d) przy $V = 30$ km/h oraz e) i f) przy $V = 110$ km/h

Z analogicznych badań przeprowadzonych przez autorów dla koła z płaskim miejscem [2], [3] jak i dotychczasowych obserwacji eksploatacyjnych, wynika, że po przekroczeniu tzw. prędkości krytycznej, która wynosi około 30 km/h, następuje utrata kontaktu koła z szyną. Zjawisko to może również zaistnieć dla uszkodzenia w postaci nalepu, co potwierdzają badania w zakresie wyższych prędkości, rys. 6 c do f.

Zauważalna jest proporcjonalność wzrostu tego stosunku od obciążenia pudła wagonu, przy czym gradient tego wzrostu jest wyższy dla toru miękkiego. Uzyskane wartości sił dynamicznych potwierdziły również znaczący wpływ sztywności toru. Dla toru miękkiego, siły dynamiczne pochodzące od uderzenia nalepu są ponad dwukrotnie mniejsze niż w przypadku toru twardego, rys. 6 i 7. Tor miękki ze względu na swoją podatność ulega większemu ugięciu wskutek uderzenia (w porównaniu z torem twardym), w konsekwencji osłabiając siły dynamiczne. Ma to istotne reperkusje eksploatacyjne, gdyż w okresie zimowym, kiedy podtorze jest bardziej sztywne, szyny częściej pękają od uderzeń nalepów i płaskich miejsc.



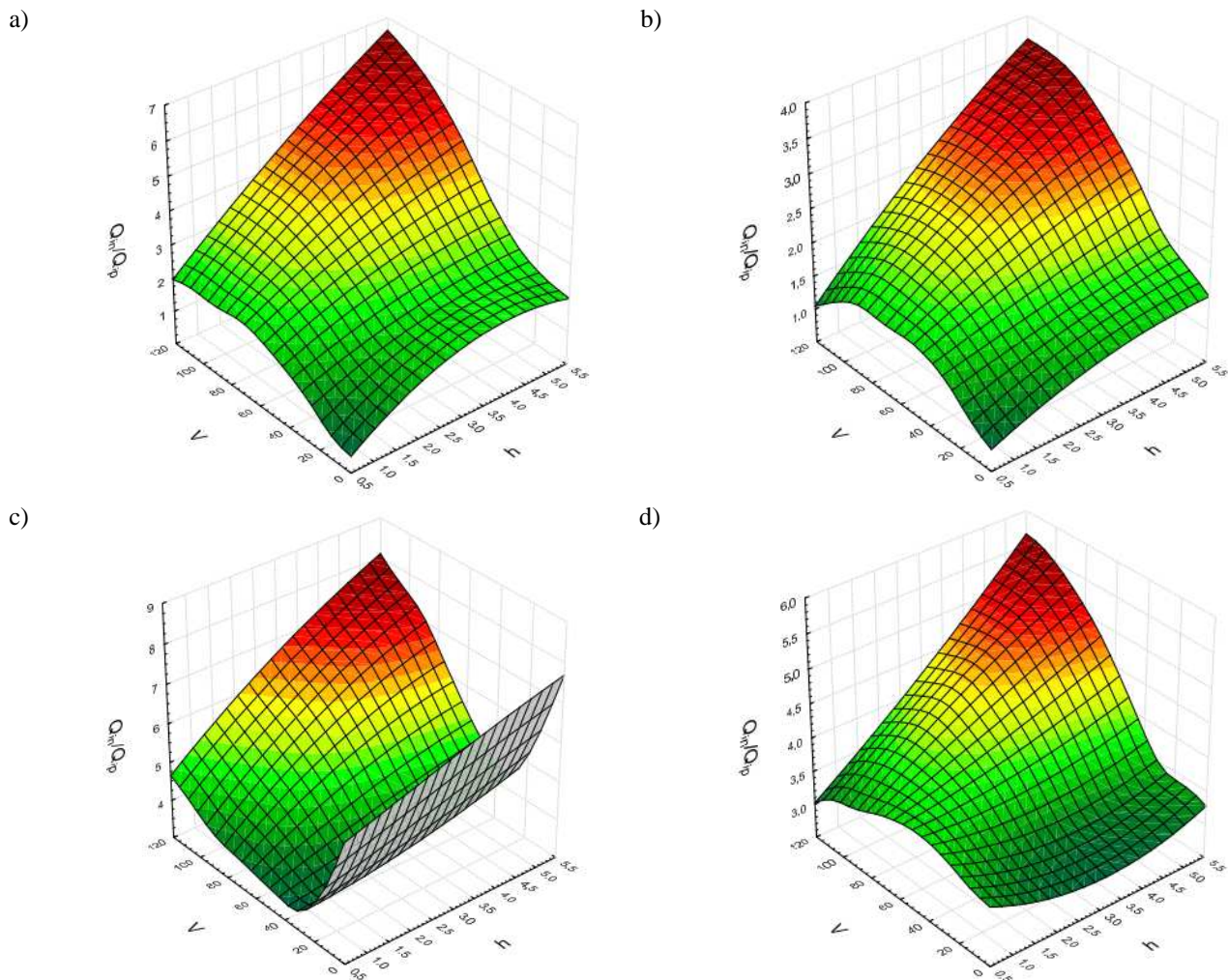
Rys. 7. Funkcje zależności stosunku sił Q_i/Q_d od wielkości nalepu h_n i prędkości przy różnej sztywności toru, dla: a) i b) $M_p = 10$ t odpowiednio dla toru twardego i miękkiego, takiego jak dla c) i d) przy $M_p = 30$ t

Autorzy zbadali też wzajemne relacje sił uderu między nalepami a płaskimi miejscami, dla tych samych wartości i parametrów, rys. 8. Wyznaczono stosunki sił Q_{in}/Q_{ip} , dla których zawsze uzyskano wartości większe od jedności, w skrajnych przypadkach od 4 do 8. Stosunek ten intensywnie rośnie w miarę zwiększania się wielkości uszkodzenia i prędkości, przyjmując odpowiednio większe wartości dla toru twardego. Jedynym odstępstwem dla toru twardego są małe wartości prędkości, gdzie zjawiska dynamiczne są mniej regularne. Tak duże przeciążenia wywoływane przez nalepy, stanowią jeszcze większe zagrożenie eksploatacyjne niż płaskie miejsca.

4. WNIOSKI

Siła dynamiczna przekazywana na szynę przez koło z nalepem w skrajnych przypadkach dla znacznych wartości uszkodzeń, może osiągać kilkunastokrotny przyrost oddziaływań przenoszonych się na tor (w stosunku do sił występujących dla nie uszkodzonych powierzchni tocznych kół). Dlatego przyjęte z premedytacją do badań, wartości nalepów przekraczające nawet pięciokrotnie dopuszczalny ich wymiar, miały za cel prezentację skali problemu i jego konsekwencji dla szyn. Jak wynika z badań doświadczalnych, już kilkakrotny wzrost siły oddziaływania na tor, może spowodować jej pęknięcie [5]. Zjawisko to jest szczególnie uciążliwe eksploatacyjnie w okresie zimowym (liczne pęknięcia szyn), gdzie tor jest twarde a siły dynamiczne wyższe. Pociuszającym zjawiskiem jest stosunkowo mniejsza populacja kół z nalepami niż z płaskimi miejscami, które jak wykazali autorzy, są mniej niebezpieczne dla toru.

Wykorzystane w badaniach symulacyjnych środowisko UM LOCO okazało się przyjazne użytkownikowi. Jednak dalsze prace nad badaniami wzajemnych sił „uszkodzone koło – szyna” i odwrotnie „uszkodzona powierzchnia toczna szyny – koło”, wymagać będzie uzupełnienia tego oprogramowania o dodatkowe moduły. Ten ostatni przypadek uszkodzeń jest szczególnie interesujący ze względu na często występujące wady powierzchni tocznej główki szyny, jak punktowe ubytki, wybuxsowania, falistość i cała rodzina tzw. wad kontaktowo – naprężeniowych. W tych miejscach następuje pęknięcie szyn, ze względu na silne koncentracje naprężeń, wywołanych dynamicznym oddziaływaniem kół wagonowych.



Rys. 8. Funkcje zależności stosunku sił impulsowych oddziaływania zestawu na szynę od nalepu do płaskiego miejsca Q_{in} / Q_{ip} o tym samym rozmiarze h w funkcji prędkości przy różnej sztywności toru, dla: a) i b) $M_p = 10$ t odpowiednio dla toru twardego i miękkiego, i analogicznie c) i d) przy $M_p = 30$ t

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bałuch M.: *Graniczne wartości nadwyżek dynamicznych przy wykrywaniu płaskich miejsc na kołach przez urządzenia detekcji taboru*. Technika Transportu Szynowego, 2009, nr 7/8, s. 71-76.
- [2] Lesiak P., Podsiadło R.: *Symulacyjne badania dynamicznego oddziaływania koła z płaskim miejscem na szynę w środowisku Universal Mechanizm Loco*. TRANSCOMP 2011. Logistyka 6/2011 (płyta CD).
- [3] Lesiak P.: *Badania i analiza właściwości metrologicznych wybranych metod pomiaru spłaszczeń w kołach wagonowych*. Rozprawa doktorska, Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1980.
- [4] Pawełczyk M.: *Badanie dynamiki układu: koło z płaskim miejscem – szyna*. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów nr 1(68)/2008, Wydział SiMR PW Warszawa 2008 s.73 – 81.
- [5] Towpik K.: *Infrastruktura drogi kolejowej obciążenia i trwałość nawierzchni*. Wydawnictwo Instytut Technologii Eksploatacji, Warszawa – Radom 2006.
- [6] *System wykrywania stanów awaryjnych taboru kolejowego podczas jazdy*. Materiały firmy TENS Sp. z o. o., Gdańsk.
- [7] *Elektroniczny podręcznik użytkownika Universal Mechanizm 6.0, 2010*. Laboratory of Computational Mechanics, Bryansk State Technical University.
- [8] *Ogólna umowa o użytkowaniu wagonów towarowych (AVV). Załącznik nr 10. Wagony towarowe – naprawa i utrzymanie prewencyjne*. Internet www.pkp-cargo.pl/download.php?file=Zacznik_10.pdf