

Wpływ agresywności zestawu pojazdów i przyczep niskopodwoziowych do przewozu ładunków ponadnormatywnych na nawierzchnie drogowe

The impact of the aggressiveness of a combination of vehicles and low-bed trailers for the transport of oversize loads on road surfaces

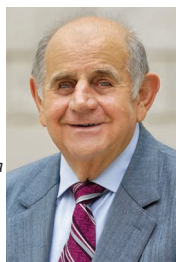


Piotr Mackiewicz

Dr hab. inż., Prof. PWR

Politechnika Wrocławska, Katedra
Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk

piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl
ORCID: 0000-0002-3170-6415



Antoni Szydło

Prof. dr hab. inż.

Politechnika Wrocławska, Katedra
Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk

antoni.szydlo@pwr.edu.pl
ORCID: 0000-0002-3363-9391

Streszczenie: Przedmiotem artykułu jest ocena nośności nawierzchni w wyniku oddziaływania zestawu pojazdów i przyczep niskopodwoziowych do przewozu ładunków ponadnormatywnych. Analizę przeprowadzono na przykładzie przewozu elementów tarczy TBM do drążenia tunelu na drodze ekspresowej S19 w miejscowości Babica. Trasa przejazdu rozpoczyna się w Opolu, a kończy na drodze ekspresowej S19 w miejscowości Babica

Słowa kluczowe: Nawierzchnia podatna; Nawierzchnia sztywna; Oś standardowa; Obciążenie ponadnormatywne; Trwałość zmęczeniowa

Abstract: This article assesses the load-bearing capacity of road surfaces as a result of the impact of a combination of vehicles and low-bed trailers transporting oversized loads. The analysis was conducted using the example of transporting TBM shield components for tunneling on the S19 expressway in Babica. The route begins in Opole and ends on the S19 expressway in Babica.

Keywords: Flexible pavement; Rigid pavement; Standard axle; Overload; Fatigue life

Opis i charakterystyka zestawu transportowego

Zestaw transportowy składa się z pojazdu ciągnącego (pojazd pierwszy – „ciągnik”), dwóch przyczep transportowych oraz pojazdu pchającego-hamującego (pojazd ostatni – „pchacz”). Na rys. 1 przedstawiono schemat zestawu transportowego.

Ciągnik posiada 4 osie, każda z przyczep posiada po 17 osi, pchacz posiada analogicznie jak ciągnik 4 osie. Na rys.

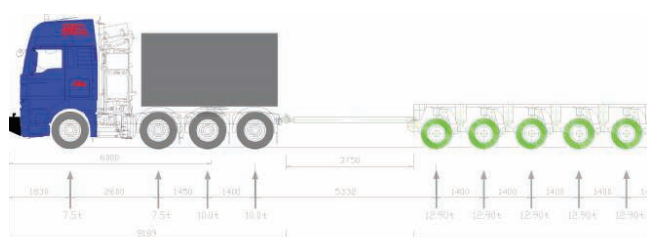
2 przedstawiono ciągnik z fragmentem przyczepy. Na rys. 3 przedstawiono pchacz z fragmentem przyczepy.

Na rys. 2 i 3 zaprezentowano także wartości obciążenia osi oraz ich rozstaw. W ciągniku i pchaczu maksymalne obciążenia osi wynoszą 100 kN, rozstaw 1,4 m oraz 1,45 m. Osie 100 kN w tym pojeździe posiadają koła bliźniacze. W przyczepie maksymalne obciążenie osi wynosi 129 kN, a ich rozstaw wynosi 1,4 m. Na rys. 4 przedstawiono wymiary szczegółowe przyczepy.

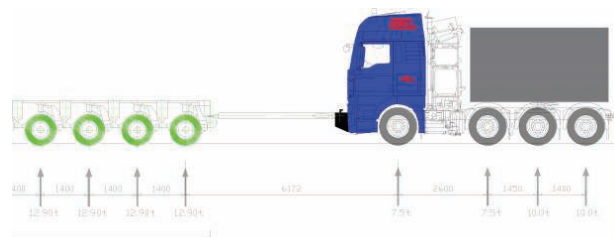
Odległość pomiędzy środkami osi kół bliźniaczych wynosi 1,78 m. Rozstaw osiowy kół bliźniaczych wynosi 0,705 m. Odległość pomiędzy wewnętrznymi kołami bliźniaczymi wynosi 0,81 m. Obciążenie jednostkowe oddziaływania koła na nawierzchnię wynosi 0,9 MPa. Powyższe informacje tj. obciążenia osi oraz rozstawy osi i kół posłużą do tworzenia modelu obciążenia zestawu na nawierzchnię drogową.



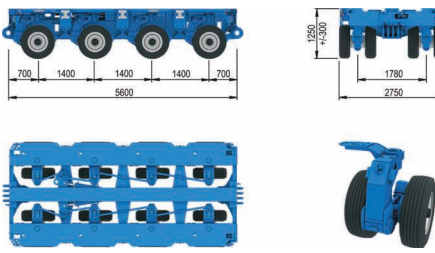
1. Schemat zestawu transportowego



2. Ciągnik wraz z fragmentem przyczepy



3. Pchacz z fragmentem przyczepy



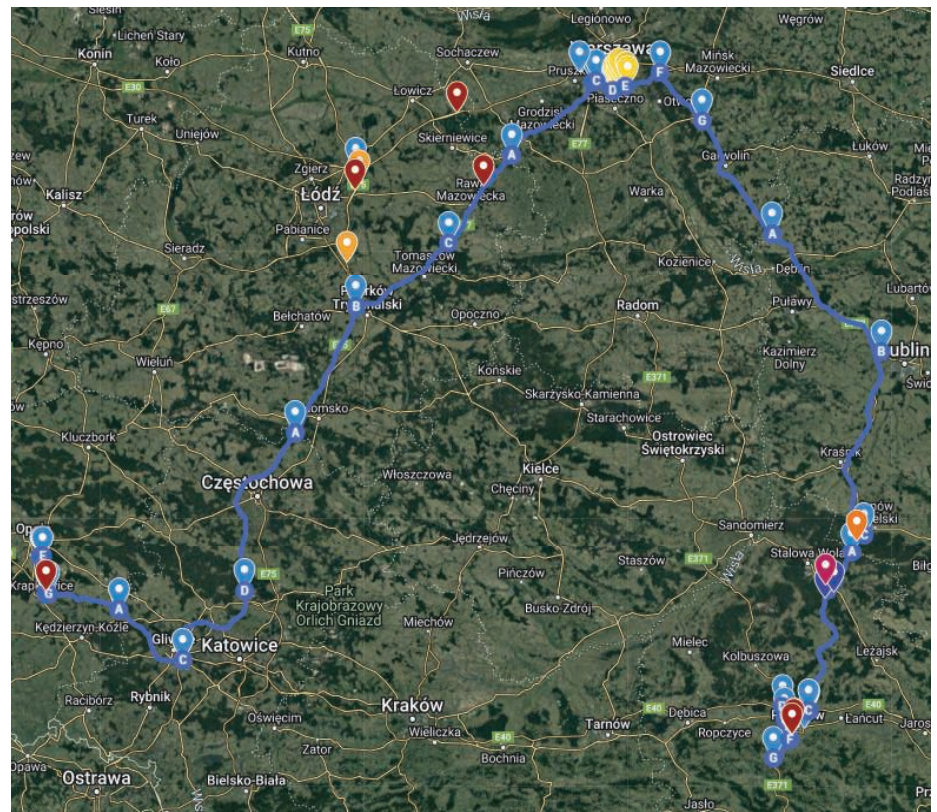
4. Wymiary szczegółowe przyczepy

Trasa przejazdu zestawu transportowego

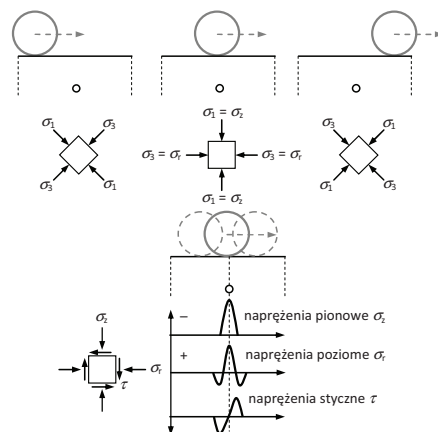
Zestaw transportował tarczę TBM i jej elementy do drążenia tunelu na drodze ekspresowej S19. Transport odbywał się na trasie Opole – Babica. Do Opola zestaw przetransportowano drogą wodną ze Szczecina. Długość trasy wynosiła około 745 km. Zaplanowany przejazd przebiegał następującymi drogami: DW423, A4, A1, S8, S2, S17, S19, DK19, S19, A4, A19, A4, S19, DK9, DK19, DW988. Na podanych drogach występowały zróżnicowane nawierzchnie drogowe wykonane w technologii asfaltowej i betonowej. W dalszej części artykułu na podstawie danych dostarczonych przez zamawiającego zestawiono szczegółowo zidentyfikowane nawierzchnie na różnych odcinkach. Na rys. 5 pokazano przebieg planowanej trasy przejazdu.

Modele obciążenia nawierzchni drogowej

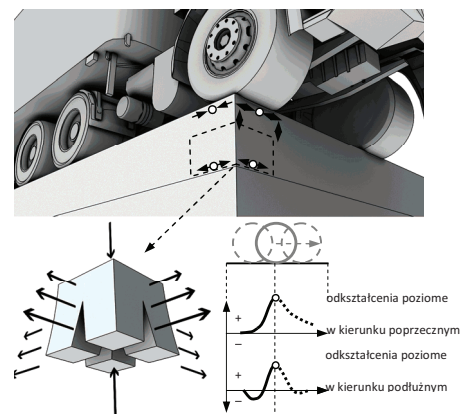
W celu oszacowania oddziaływania zestawu transportowego na nawierzchnie na trasie przejazdu oraz potencjalnej utraty jej trwałości opracowano różne modele, które pozwoliły w dalszym etapie określić trwałości nawierzchni. W pierwszym etapie modelowania opracowano model obciążenia zestawu. Analizę przeprowadzono w odpowiednio opracowanym modelu numerycznym opartym na półprzestrzeni sprężystej. Autorzy zwracają uwagę, że kluczowym elementem w analizie nawierzchni jest sposób przekazywania obciążenia przez koła oraz lokalizacja wzajemna osi. Podczas przejazdu koła w dolnych warstwach nawierzchni powstaje złożony stan naprężenia (rys. 6, 7). W różnym zakresie pojawiają się naprężenia pionowe, poziome oraz styczne wywołujące głów-



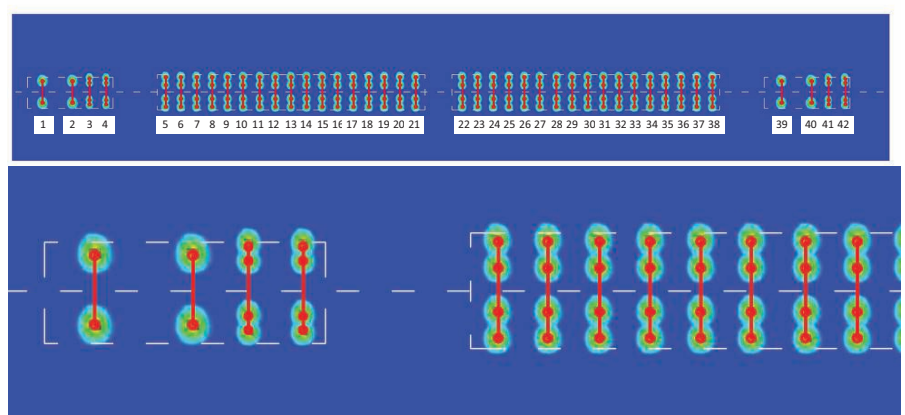
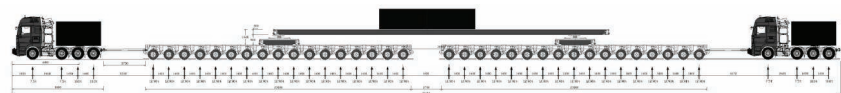
5. Trasa przejazdu zestawu transportowego



6. Zmiana rozkładu naprężeń podczas przejazdu koła



7. Typowy rozkład odkształceń w nawierzchni pod obciążeniem



8. Model obciążenia

nie ściskanie i rozciąganie.

Wzajemne położenie osi oraz typ kół (pojedyncze lub podwójne) ma istotne znaczenie w przyszłej analizie odkształceń i naprężeń.

W świetle zaprezentowanego oddziaływania opracowano model obciążenia dla zestawu transportowego. Wstępne obliczenia wskazały, że należy uwzględniać cały zestaw i kompletne konfiguracje osi, mimo ich dużych odległości w zakresie od 2.6 m (pojazd) do 1.4 m (przyczepy). Powstające w nawierzchni w zależności od różnej jej sztywności odkształcenia i naprężenia na różnych głębokościach są wzajemnie „znoszone” lub sumowane wskutek superpozycji. Na rys. 8 zaprezentowano schemat obciążenia zastosowany przy analizach numerycznych konstrukcji.

W modelu uwzględniono konfigurację osi oraz kół w osiach. Przyjęto następujące wartości obciążeń dla poszczególnych elementów zestawu transportowego, tab. 1.

Dodatkowo w modelowaniu nawierzchni uwzględniono odrębny model osi standardowej 115 kN. Zamodelowaną jako oś pojedynczą o kołach bliźniaczych, tab. 2.

Nawierzchnie i modele nawierzchni na trasie przejazdu

W celu oszacowania oddziaływania zestawu transportowego na nawierzchnie na trasie przejazdu oraz potencjalnej utraty jej trwałości opracowano w drugim etapie modele nawierzchni, oparte na zidentyfikowanych konstrukcjach dostarczonych w różnych materiałach przez zamawiającego. Przyjęto układ następujących warstw (rys. 9):

- warstwy asfaltowe lub warstwa betonowa,
- warstwa podbudowy,
- warstwa podłoża.

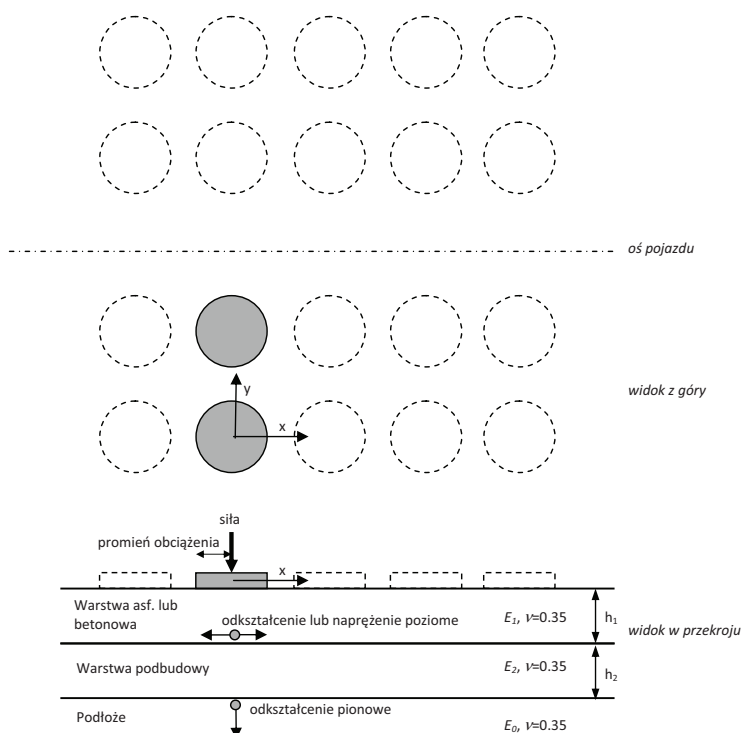
Uwzględniano układ i liczbę osi znajdującą się w całym zestawie transportowym. W analizach obliczeniowych modelu opartym na warstwowej półprzestrzeni sprężystej zidentyfikowano wartości odkształceń rozciągających na spodzie warstw asfaltowych lub naprężeń rozciągających na spodzie warstwy betonowej oraz wartości odkształceń

Tab. 1. Parametry obciążeń dla poszczególnych elementów zestawu transportowego

ciągnik					
	Nacisk na oś [kN]	Nacisk na koło [kN]	Promień śladu obciążenia [m]	Rozstaw w osi w przekroju poprzecznym [m]	Rozstaw pomiędzy kołami bliźniaczymi [m]
Oś 1	75	37.5	0.118	2	-
Oś 2	75	37.5	0.118	2	-
Oś 3	100	25	0.094	2	0.309
Oś 4	100	25	0.094	2	0.309
przyczepa 1					
Każda z 17 osi	129	32.25	0.107	1.78	0.705
przyczepa 2					
Każda z 17 osi	129	32.25	0.107	1.78	0.705
pchacz					
Oś 1	75	37.5	0.118	2	-
Oś 2	75	37.5	0.118	2	-
Oś 3	100	25	0.094	2	0.309
Oś 4	100	25	0.094	2	0.309

Tab. 2. Parametry obciążeń dla osi standardowej

Oś standardowa					
	Nacisk na oś [kN]	Nacisk na koło [kN]	Promień śladu obciążenia [m]	Rozstaw w osi [m]	Rozstaw pomiędzy kołami bliźniaczymi [m]
Oś	115	28.75	0.103	2	0.309

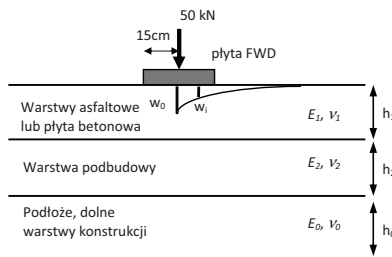


9. Model układu warstwowego

pionowych w podłożu gruntowym. Wartości te posłużyły w dalszym etapie do analizy trwałości nawierzchni na trasie przejazdu. Uwzględniono dodatkowo wartości obliczonych parametrów w kierunku x oraz y, który przy tak zróżnicowanej konfiguracji kół osi nie jest jednoznaczny.

Parametry modelu obliczano na

podstawie identyfikacji modułów przedmiotowych nawierzchni. W tym celu wykorzystano parametry czasy ugięć, które dostarczono autorom przez Zlecającego a które otrzymano w ramach diagnostyki wg DSN. W tym celu wykorzystano pomiary ugięć w osi obciążenia ugięciomierzem FWD oraz parametr SCI 300, będącego róż-



10. Model obliczeniowy identyfikacji modułów

nicą ugięcia maksymalnego i ugięcia w odległości 0,3 m od osi obciążenia.

Na trasie jest wiele odcinków nowo wybudowanych na których nie była prowadzona jeszcze diagnostyka DSN. Na tych odcinkach wykorzystano parametry modelu przyjmowane do obliczeń z wykorzystaniem metod mechanistycznych na etapie projektowania konstrukcji nawierzchni. Na rys. 10 przedstawiono model identyfikacji parametrów modelu.

Założony układ konstrukcji nawierzchni składa się z trzech warstw. Warstwa o grubości h_1 opisuje, warstwy asfaltowe M(MA) lub płyty betonowej. Warstwa o grubości h_2 opisuje podbudowę. Warstwa o grubości h_0 – zastępcze podłoże tj. wzmocnienie podłoża i warstwy dolne.

Obliczenia wykonywano na podstawie programu CZUG opracowanego przez autora [1]. W wyniku identyfikacji uzyskuje się wartości modułów (E) poszczególnych warstw. W tym wypadku warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych lub płyty betonowej, podbudowy oraz podłoża wzmocnionego. Współczynniki Poissona (ν) nie wpły-

Tab. 3. Charakterystyka wybranych konstrukcji na trasie przejazdu

DW423 Opole, park przemysłowy METALCHEM			
Warstwa	Grubość [cm]	Grubość warstw w modelu [cm]	Parametry modelu [MPa]
MMA SMA11	4	18	13 000
MMA AC16W PMB	5		
ACWMS	9		
MNZ 0/31.5	20	20	400
MZSH/podłoże	20	-	120
A1 Pyrzowice - Bełchatów (Piotrków Trybunalski)			
Warstwa	Grubość [cm]	Grubość warstw w modelu [cm]	Parametry modelu [MPa]
Płyta betonowa	29	29	35 000
MZSH C8/10	20	20	2 000
Wzmoc. podłoże	-	-	120

wają znacząco na uzyskiwane wartości modułów.

W tab. 3 zaprezentowano nawierzchnie (asfaltową i betonową) na wybranych odcinkach trasy przejazdu oraz parametry w modelach trójwarstwowych nawierzchni.

Wyniki obliczeń wartości odkształceń i naprężeń

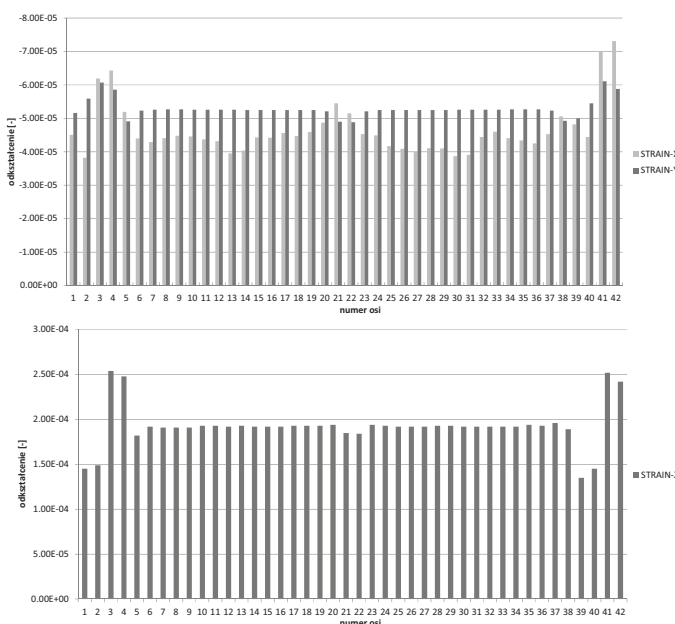
Na podstawie obliczeń w modelach nawierzchni uzyskano wyniki odkształceń i naprężeń. Przykładowe wyniki dla wybranych typów konstrukcji o przedstawiono oraz na rys. 11 i 12.

Uzyskano zróżnicowane wartości odkształceń dla różnych typów nawierzchni oraz różnych osi. Należy zauważyć, że wartości odkształceń lub naprężeń są większe dla kierunku Y (kierunek poprzeczny w stosunku do kierunku ruchu pojazdu). Największe wartości odkształceń lub naprężeń

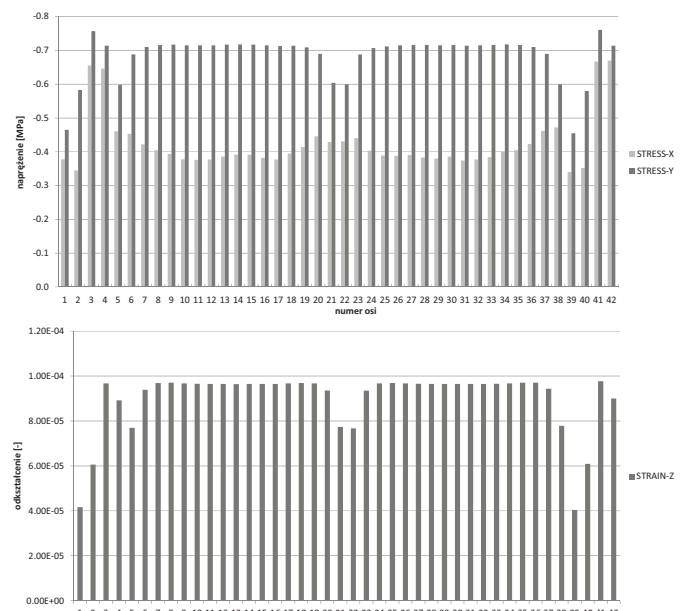
występują dla skrajnych osi oraz osi występujących w ciągniku i pchaczu (osie 100 kN). Należy zwrócić uwagę, że występują w tej osi koła podwójne położone blisko siebie oraz wywołujące nacisk na małej powierzchni. W przypadku przyczep występują większe naciski, ale na większej powierzchni a koła podwójne są w większej odległości. Dzięki temu nie dochodzi do kumulowania się wartości odkształceń.

Wyniki obliczeń trwałości

Trwałość zmęczeniowa jest określana jako dopuszczalna liczba powtarzalnych cykli zmiennego naprężenia lub odkształcenia, jakie może przenieść nawierzchnia zanim dojdzie do jej zniszczenia. W przypadku analizy konstrukcji nawierzchni trwałość stanowi liczba osi, jaką może ona przenieść do wystąpienia stanu krytycznego. W zależności od typu konstrukcji przez stan



11. Wyniki dla DW423 Opole, park przemysłowy METALCHEM



12. Wyniki dla A1 Pyrzowice - Bełchatów (Piotrków Trybunalski)

krytyczny rozumie się pojawienie się pęknięć lub powstanie deformacji. W niniejszych analizach przyjęto w obliczeniach dla nawierzchni asfaltowych kryterium Instytutu Asfaltowego, natomiast dla nawierzchni betonowych kryterium jakie zastosowano w Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych, GDDKiA, Warszawa, 2014r. [2] Dla weryfikacji trwałości podłoża gruntowego zastosowano kryterium Instytutu Asfaltowego deformacji strukturalnych nawierzchni (podłoża gruntowego). Kryterium Instytutu Asfaltowego przyjęto z tego względu, że konstrukcje podatne na trasie przejazdu pojazdu były wymiarowane z wykorzystaniem tego kryterium.

Kryterium zmęczeniowe w ogólnej formie opisane jest zależnością [4], [5]:

$$N_f = Ck_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \left(\frac{1}{E} \right)^{k_3} \quad (1)$$

gdzie:

N_f – liczba obciążeń do powstania spękań zmęczeniowych, [-],
 ε_t – odkształcenie rozciągające w krytycznym punkcie przekroju, [-],
 E – moduł sztywności MMA, [MPa],
 C – współczynnik zależny od właściwości MMA, [-],
 k_1, k_2, k_3 – współczynniki regresji, [-].

Dla kryterium Instytutu Asfaltowego stosuje się zależność:

$$N_f = 18.4 \cdot 10^{4.84(V_b/(V_a+V_b)-0.69)} \cdot$$

gdzie:
 V_a – zawartość wolnych przestrzeni [%], przyjęto wartość 7%,
 V_b – zawartość objętościowa asfaltu [%], przyjęto wartość 9%.

Kryterium deformacji strukturalnych nawierzchni (podłoża gruntowego) pozwala wyznaczyć trwałość konstrukcji do powstania krytycznej deformacji strukturalnej 12.5 mm na podstawie zależności pomiędzy dopuszczalną liczbą powtarzalnych obciążeń a odkształceniem pionowym podłoża gruntowego. Określone jest ogólną zależnością:

$$\varepsilon_p = k \cdot (1/N)^m \quad (3)$$

gdzie:

ε_p – odkształcenie pionowe na powierzchni podłoża gruntowego [-],
 k, m – współczynniki eksperymentalne zależne od rodzaju kryterium, $1.05 \times 10^{-2}, 0.223$,
 N – liczba dopuszczalnych obciążeń do wystąpienia krytycznej deformacji strukturalnej.

Analizę trwałości nawierzchni betonowej (płyty) przeprowadzono wykorzystując zależność określającą dopuszczalną wytrzymałość płyty betonowej, jako funkcję liczby obciążeń (6).

$$F(\sigma_{dop}) = R_{zg} \cdot (1 - 0.078 \cdot \log N) \quad (4)$$

gdzie:

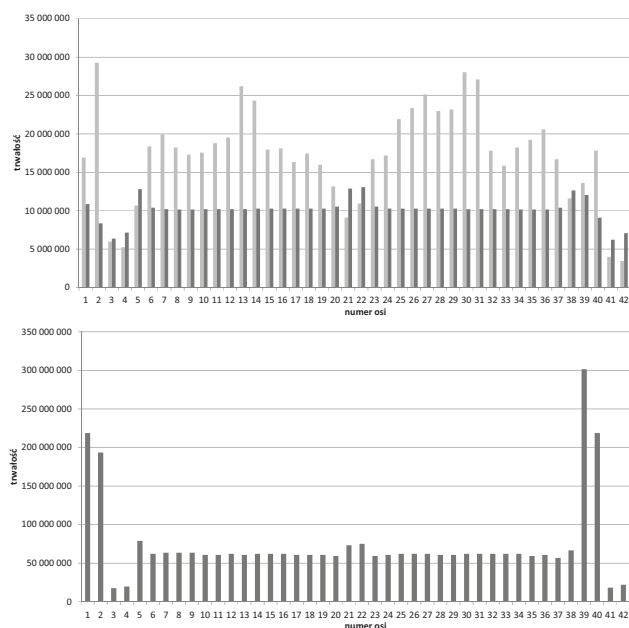
R_{zg} – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu (przyjęto 5.5 MPa),
 N – liczba powtarzalnych obciążeń,
 $F(\sigma_{dop})$ – funkcja naprężeń w płycie betonowej od obciążenia i temperatury,
 $F(odop) = \gamma_m \cdot [\gamma_p \cdot (n \cdot \sigma_p) \cdot \gamma_t \cdot (n \cdot \sigma_t)]$,
 $\gamma_m, \gamma_p, \gamma_t$ – współczynniki: materiałowy (1.2), obciążenia (1.2), temperatury (1.2),
 σ_p, σ_t – naprężenia od obciążenia [MPa] i temperatury [MPa],
 n – współczynnik dyblowania (0.8).

W obliczeniach trwałości naprężeń uwzględniono, że obciążenie działa na krawędzi płyt (wariant niekorzystny) oraz występuje gradient temperatury, którego wartość przyjęto wg KTKNSz.

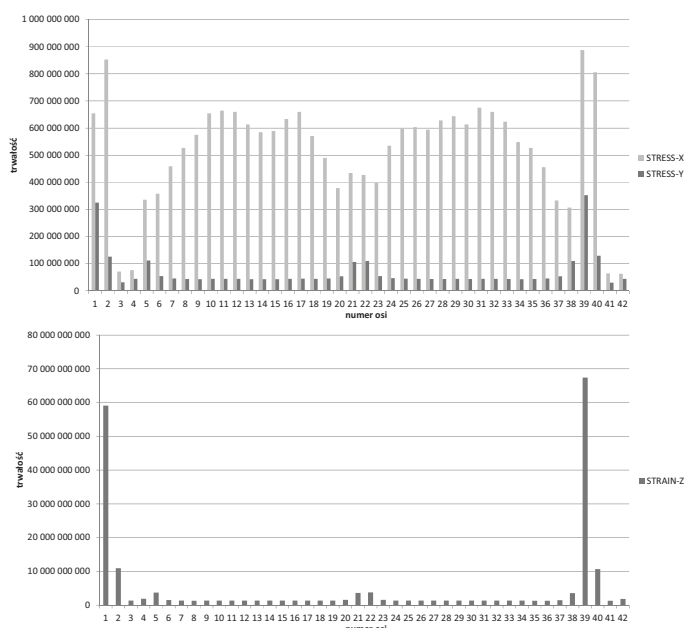
Wyniki obliczeń trwałości przestawiono wybranych odcinków dróg pokazano na rys. 13 i 14.

Na podstawie obliczeń uzyskano zróżnicowane wartości trwałości zmęczeniowej. Są one uzależnione od uzyskanych wcześniej wartości odkształceń i naprężeń występujących w warstwach asfaltowych lub płycie betonowej oraz w podłożu.

W dalszym etapie analiz w celu miarodajnej oceny wpływu degradacji nawierzchni w wyniku przejazdu zestawu transportowego przeanalizowano wywołaną szkodę zmęczeniową na nawierzchnię określaną jako sumę wartości $1/N_i$, N_i oznacza trwałość zmęczeniowa wyliczoną dla kolejnej i – tej osi z zestawu. Przeanalizowano szkody zmęczeniowe dla kierunku X oraz Y oraz oddziaływania na podłożo Z. Aby okre-



13. Wyniki dla DW423 Opole, park przemysłowy METALCHEM



14. Wyniki dla A1 Pyrzowice - Bełchatów (Piotrków Trybunalski)

Tab. 4. Wyniki szkody zmęczeniowej oraz współczynnika agresywności

	kierunek_x	kierunek_y	kierunek_z
DW423 Opole, park przemysłowy METALCHEM			
zestaw transp. szkoda suma 1/N	3.07E-06	4.24E-06	7.69E-07
oś 115 kN szkoda 1/N	2.52E-07	8.34E-08	2.56E-08
współczynnik agresywności	12	51	30
A1 Pyrzowice - Bełchatów (Piotrków Trybunalski)			
zestaw transp. szkoda suma 1/N	1.30E-07	8.38E-07	2.58E-08
oś 115 kN szkoda 1/N	1.36E-08	5.71E-09	1.18E-10
współczynnik agresywności	10	147	218

ślić wielkość oddziaływania zestawu w stosunku do osi standardowej 115 kN wyznaczono agresywność zestawu transportowego jako stosunek szkody zestawu do szkody osi 115 kN. Wartość współczynnika agresywności pozwala określić liczbę osi standardowych wywołującą szkodę zmęczeniową taką samą jak przejazd zestawu transportowego (ciągnik + przyczepa 17 kołowa + przyczepa 17 kołowa + pchacz). Przykładowo współczynnik agresywności 12 oznacza, że przejazd jednego zestawu transportowego wywołuje szkodę zmęczeniową w nawierzchni taką jak przejazd 12 osi standardowych. Wyniki przedstawiono w tab. 4.

Analizując uzyskane wartości współczynników agresywności (także dla innych odcinków nie zamieszczanych w artykule) stwierdzon, że wynoszą one dla odcinków działających w kierunku X od 8 do 12. W kierunku Y od 51 do 151. W kierunku Z od 30 do 218. Liczby te oznaczają ilość przejazdów osi standardowych wywołujących taką samą szkodę zmęczeniową jak przejazd jednego zestawu transportowego. Przy czym należy sobie zdawać sprawę, że dopuszczalna liczba obciążeń osi stan-

dardowych dla nawierzchni charakteryzowanych liczbą 218 wynosi ok. 3 000 000 000 a więc jest to niewielki ułamek dopuszczalnej liczby obciążeń. Podobnie dla nawierzchni charakteryzowanej liczbą 8 dopuszczalna liczba obciążeń wynosi ok. 35 000 000. Reasumując należy stwierdzić, że agresywność zestawu transportowego w stosunku do osi standardowej jest nieznaczna w przypadku sporadycznego przejazdu.

Podsumowanie

W artykule przeanalizowano wpływ oddziaływania zestawu transportowego przewożącego ponadnormatywny ciężar na różne konstrukcje nawierzchni występujące na jego trasie. W modelach obliczeniowych wyznaczono wartości odkształceń i naprężeń, które wykorzystano do wyznaczenia trwałości zmęczeniowej. Trwałość zmęczeniową wykorzystano do określenia współczynnika agresywności, który określa nam liczbę osi standardowych wywołujących taką samą szkodę zmęczeniową w nawierzchni jak przejazd jednego zestawu transportowego (ciągnik + przyczepa + przyczepa +

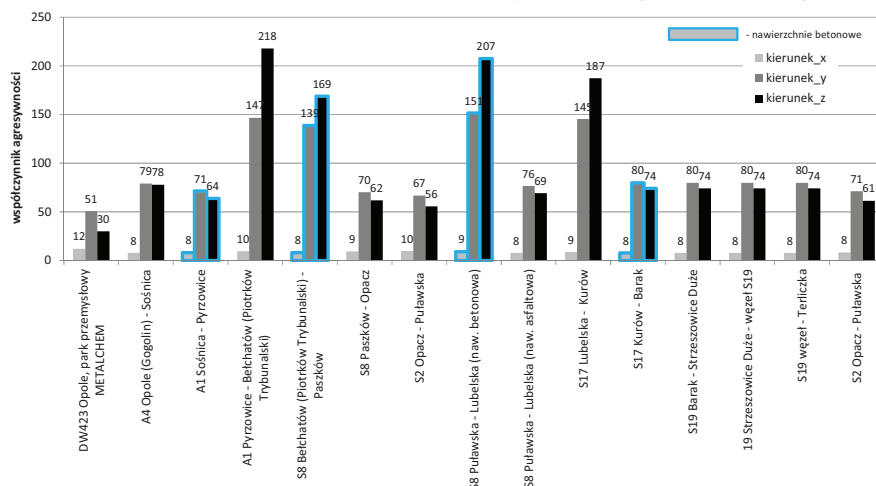
pchacz). Na rys. 15 zestawiono wartości współczynników agresywności dla wszystkich analizowanych nawierzchni na trasie przejazdu. Kolorem niebieskim dodatkowo wyróżniono nawierzchnie betonowe.

Należy mieć na uwadze, że dla nawierzchni betonowych dopuszczalna liczba obciążeń osi standardowych wynosi ok. 85 000 000 osi 115 kN w okresie eksploatacji. Dla nawierzchni podatnych dopuszczalna liczba obciążeń osi standardowych wynosi ok. 40 000 000 osi 115 kN.

Ostatecznie należy stwierdzić, że oddziaływanie zestawu transportowego nie jest duże w stosunku do osi standardowej 115 kN. Jeden przejazd zestawu transportowego (o sumarycznej liczbie osi 42) odpowiada przejściom od 8 do 218 osi standardowych w zależności od rodzaju nawierzchni. Jest to nieznaczny ułamek dopuszczalnej liczby obciążeń osiami standardowymi.

Materiały źródłowe

- [1] Szydło Antoni „Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych”, Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, nr 45/1995
- [2] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych, GDDKiA, Warszawa, 2014
- [3] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych, GDDKiA, Warszawa 2014
- [4] FINN F.N., SARAF C., KULKARNI R., NAIR K., SMITH W., ABDULAH A., The use of Distress Prediction Subsystems for the Design of Pavement Structures, Proceedings, Fourth International Conference on the structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, 1977, Vol. 1, 3–38
- [5] Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Report, Part 3 – Design and Analysis, NCHRP, TRB, NRC, March 2004
- [6] Applied Research Associates (ARA). 2004. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report. Transportation Research Board



15. Zestawienie wyników współczynnika agresywności dla analizowanych nawierzchni