

Analiza porównawcza z zastosowaniem MES wybranych kształtów protektora pneumatycznego mechanizmu jezdnych ze względu na propagację nacisków w glebie

Włodzimierz Malesa

Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa Lądowego, Mechaniki i Petrochemii,
Katedra Inżynierii Systemów Mechanicznych i Automatyki
ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock, e-mail: polsw@pw.plock.pl

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono zastosowanie systemów CAD i metody elementów skończonych (MES), w analizie porównawczej propagacji nacisków w glebie pneumatycznych mechanizmów jezdnych o różnym kształcie protektora. Wykonano model rozkładu nacisków powierzchniowych oraz obliczenia naprężeń powstałych w glebie. W następstwie uzyskanych wyników obliczeń teoretycznych została przeprowadzona analiza porównawcza wartości wyznaczonych nacisków z uzyskanymi wynikami w trakcie badań laboratoryjnych. Przeprowadzono optymalizację doboru wartości wybranej cechy geometrycznej protektora daszkowego ze względu na minimalizację nacisków w glebie na wybranych głębokościach pomiarowych.

Słowa kluczowe: oddziaływanie opony na glebę, komputerowo wspomagane projektowanie, metoda elementów skończonych, propagacja naprężeń w glebie, optymalizacja.

WPROWADZENIE

Oddziaływanie mechanizmów jezdnych na podłoże ma bardzo istotne znaczenie z wielu względów, np.: agrotechnicznych, ale również trakcyjnych. Obciążenia przenoszone na glebę wywołują zmiany jej struktury poprzez zwiększenie zagęszczenia. Prowadzi to do gorszego rozwoju mikroorganizmów i fauny glebowej, co bezpośrednio przekłada się na gorsze plonowanie roślin. W przypadku maszyn roboczych ciężkich (przemysł budowlany, pojazdy o przeznaczeniu wojskowym) dąży się do maksymalnego zwiększenia sił trakcyjnych pojazdów [6], co wywołuje wzrost nacisków wywieranych przez elementy jezdne na odkształcalne podłoże. Jednakże i w tym przypadku istnieje wartość graniczna nacisków określona nośnością gruntu, po przekroczeniu której wspomniane maszyny nie mogą właściwie funkcjonować [2, 3, 8, 12, 15].

Naciski jednostkowe występujące na powierzchni kontaktu opony z podłożem mają bezpośredni związek ze zjawiskiem ich rozprzestrzeniania się w głąb ośrodka, po którym przemierza się układ jezdny, zarówno w płaszczyźnie wzdłużnej

jak i poprzecznej do kierunku jazdy [4, 5, 10, 15, 17]. Umiejętność wyznaczania mapy propagacji nacisków w podłożu umożliwi racjonalny dobór parametrów konstrukcyjnych elementów jezdnych (m.in. kształt opon) ze względu na minimalizację wartości nacisków lub też ograniczenie zjawiska przekraczania nośności granicznej (maszyny budowlane).

Celem niniejszego opracowania było zastosowanie nowoczesnych metod modelowania cyfrowego i obliczeń numerycznych z zastosowaniem systemów CAD oraz MES w procesie określenia wpływu kształtu i geometrii bieżnika wybranej opony na propagację nacisków w podłożu.

Zastosowanie MES w omawianej dziedzinie ma istotne znaczenie ze względów ekonomicznych, gdyż badania laboratoryjno-pólowe wymagają poniesienia znacznych kosztów finansowych, z uwagi na wysoką cenę urządzeń pomiarowych oraz konieczność dysponowania odpowiednio przygotowanym terenem. Ponadto zastosowanie MES eliminuje problem sezonowości badań, który ma miejsce w przypadku prac polowych.

MODELE PRZYKŁADOWYCH OPON Z WYBRANYMI WARIANTAMI KONSTRUKCJI BIEŻNIKA WYKONANE W SYSTEMIE CAD

Wykorzystując metody modelowania bryłowego w systemach CAD opracowano modele cyfrowe trzech wariantów opony z bieżnikiem łukowym oraz trzy przykłady opony z daszkową rzeźbą protektorów. Wszystkim modelom nadano cechy geometryczne i materiałowe odpowiadające oponie Stomil 14.9R28/8PR.

Poszczególne modele bieżnika różnią się kształtem protektora (łukowy, daszkowy) oraz kątem β jego pochylenia mierzonego do osi zgodnej z kierunkiem jazdy (śląd opony) koła napędowego (rys. 2). Poniższa tabela przedstawia przyjęte do dalszej analizy wartości kąta β ustawienia protektora dla wszystkich zaplanowanych w badaniach wariantów.



Rys. 1. Cyfrowy model bryłowy koła napędowego z oponą 14.9R28/8PR

Fig. 1. Digital solid model of wheel driver with tire 14.9R28/8PR

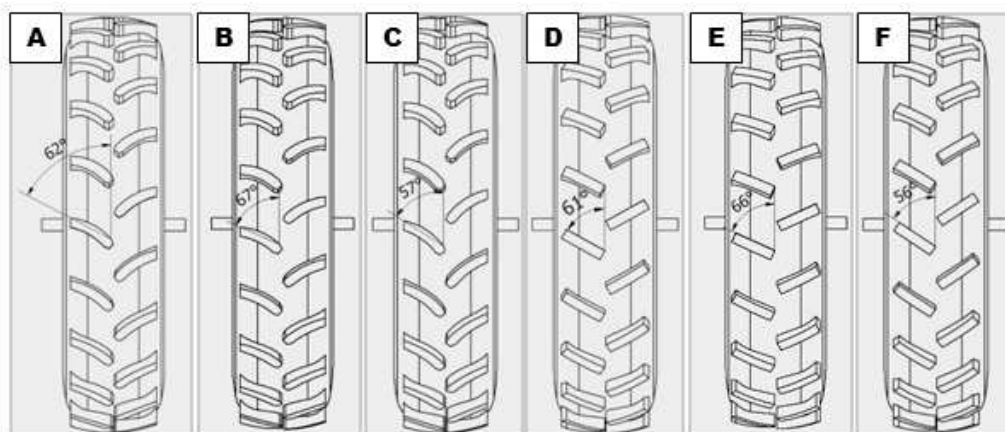
nacisków w podłożu pod działaniem statycznej siły obciążającej oś koła napędowego.

OBLICZENIA PROPAGACJI NACISKÓW W PODŁOŻU DLA WYKONANYCH MODELI OPON Z ZASTOSOWANIEM MES

Obliczenia propagacji nacisków w podłożu przeprowadzono z zastosowaniem analizy MES. Proces modelowania i obliczeń wykonano w środowisku Autodesk Inventor v. 2013, z wbudowanym modułem MES. Zadanie zostało zrealizowane w następujących etapach [6, 7, 11, 16, 19, 20]:

- utworzenie modelu geometrycznego obiektu,
- dobór własności materiałowych,
- utworzenie siatki elementów skończonych,
- określenie strefy kontaktu i typu kontaktu,
- wprowadzenie warunków brzegowych,
- rozwiązanie zadania,
- prezentacja wyników obliczeń.

Dyskretyzacja obszaru analizy polegała na wygenerowaniu siatki elementów skończonych dla wszystkich modeli cyfrowych tworzących układ jezdny (felga, opona, gleba).



Rys. 2. Przykładowe warianty modeli opon wykorzystane do obliczeń rozkładu nacisków w podłożu

Fig. 2. Exemplary embodiments of tire models used to calculation of stress propagation

Tabela 1. Wartości kąta pochylenia bieżnika dla badanych wariantów modeli cyfrowych opon

Table 1. Angle slope of studied variants of tire tread

nr wariantu	A	B	C	D	E	F
kąt pochylenia bieżnika β	62°	67°	57°	61°	66°	56°

Bazowym modelem odniesienia jest wariant A odpowiadający rzeczywistej oponie 14.9R28/8PR. Warianty B oraz C zawierają modyfikację kąta pochylenia β bieżnika znajdującego się w zbiorze wartości (-5°, +5°) w stosunku do wartości kąta odniesienia (62°). Analogicznie dla przypadku protektora daszkowego bazowa wartość kąta odniesienia β wynosiła 61°, natomiast w wariantach E i F dokonano modyfikacji kąta pochylenia o wartości -5° oraz +5° w stosunku do wariantu bazowego. Opracowanie ww. wariantów bryłowych modeli opon pozwoliło na określenie wpływu kształtu oraz kąta pochylenia bieżnika na rozkład

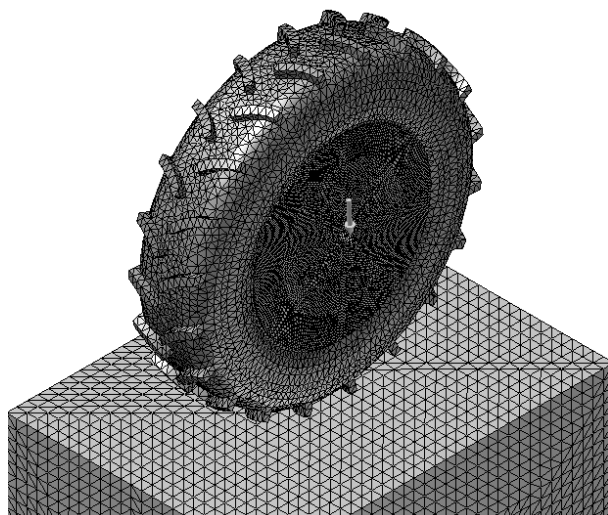
Przed utworzeniem siatki wprowadzono do systemu następujące dane konfiguracyjne [18]:

- średnia wielkość elementu w odniesieniu do maksymalnych wymiarów bryły: 0.03,
- minimalna wielkość elementu (ułamek wielkości średniej): 0.2,
- współczynnik gradacji: 1.5,
- maksymalny kąt trójkąta siatki: 60°,
- włączona opcja pomiaru elementów siatki w oparciu o wielkość zespołu.

Przyjęcie powyższych parametrów siatki poprzedził długotrwały, iteracyjny proces weryfikacji różnych wariantów jej ustawienia. Proces ten prowadzony był do momentu, gdy zwiększenie gęstości siatki nie powodowało poprawienia dokładności wyników i jednocześnie były możliwe do wykonania obliczenia przez system komputerowy w akceptowalnym czasie. Dla wyżej wymienionych parametrów analiza numeryczna MES dla jednego wariantu

trwała w przybliżeniu 60 min. na komputerze wyposażonym w dwa czterordzeniowe procesory Xeon firmy Intel z pamięcią operacyjną 16 GB.

W efekcie wygenerowano siatkę dla wszystkich zaplanowanych wariantów modeli cyfrowych układu koło-podłoże. Modele dyskretne poszczególnych wariantów różnią się nieznacznie liczbą elementów i liczbą węzłów, co jest uwarunkowane różnicami w ich budowie geometrycznej. Na rysunku nr 3 zamieszczono przykładowy model dyskretny (wariant A) odpowiadający oponie 14.9R28/8PR.



Rys. 3. Dyskretyzacja obszaru analizy
Fig. 3. Discretion of the area of analysis

Warunki brzegowe badanego układu zostały zdefiniowane przy pomocy narzędzi dialogu graficznego modułu MES. Zdefiniowano jedno wiązanie stałości (brak możliwości przemieszczenia) oraz dwa wiązania przesuwne (pozostawia możliwość obrotu i przesunięcia w wybranej płaszczyźnie odniesienia). Konfiguracja wiązań została zaplanowana w taki sposób, aby odpowiadała warunkom laboratoryjnym w kanale glebowym, wyposażonym w urządzenie Trak [4]. Było to podyktowane koniecznością weryfikacji wyników obliczeń MES z wartościami uzyskanymi na drodze doświadczalnej, dlatego odtworzono cechy kanału glebowego w modelu cyfrowym.

W badanym modelu wprowadzono następujące obciążenia:

- siła G przyłożona do osi koła, na kierunku prostopadłym do powierzchni podłoża o wartościach: 10kN, 7 kN,
- ciśnienie napompowania $p_0=225$ kPa.

WYNIKI OBLICZEŃ MES

Obliczenia wytrzymałościowe naprężeń powstających w ośrodku glebowym oparto na hipotezie Hubera-Misesa-Henckiego zaimplementowanej w systemie wykorzystywanym do analizy, zgodnie z poniższą zależnością:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_y \sigma_z - \sigma_z \sigma_x + 3\tau_{xy}^2 + 3\tau_{yz}^2 + 3\tau_{zx}^2}. \quad (1)$$

Zgodnie z metodyką pomiarów rozkładu naprężeń w ośrodku glebowym realizowanych w warunkach laboratoryjnych (kanał glebowy) oraz w badaniach polowych wyznaczono składową normalną naprężeń obliczonych w systemie MES. Składowa normalna naprężeń s_n w przyjętym układzie odniesienia ma następującą postać [13]:

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_y^2 + 3\tau_{yx}^2 + 3\tau_{yz}^2}, \quad (2)$$

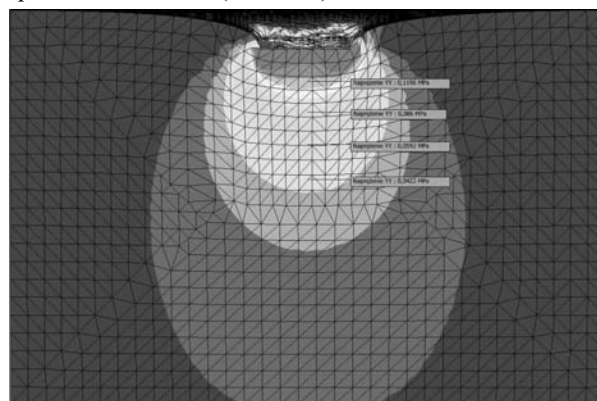
gdzie:

$$\sigma_x = 0,$$

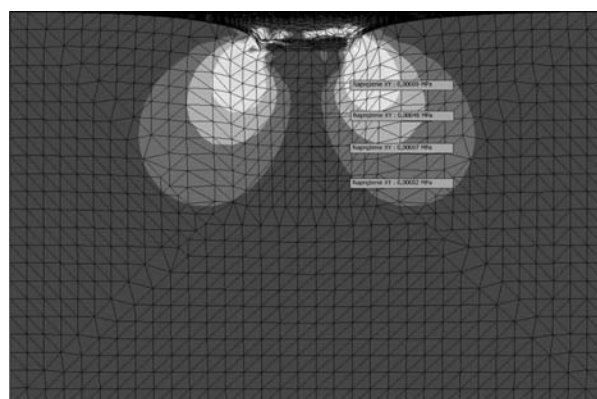
$$\sigma_z = 0,$$

$$\tau_{xz} = 0.$$

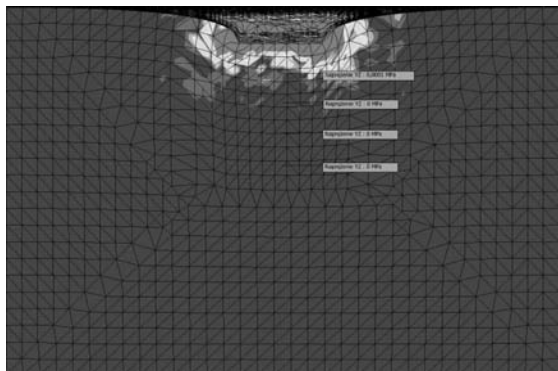
Poniżej przedstawiono mapy rozkładu naprężeń w podłożu, w płaszczyźnie prostopadłej do osi jazdy, na której znajduje się oś koła, dla przykładowego przypadku obciążenia $G=10$ kN. Wyniki przedstawiono dla modelu opony odpowiadającego własnościami materiałowymi i kształtem oponie 14.9R28/8PR (wariant A).



Rys. 4. Rozkład naprężeń s_y – wariant A, obciążenie $G=10$ kN
Fig. 4. Stress distribution s_y – variant A, force $G=10$ kN



Rys. 5. Rozkład naprężeń t_{yx} – wariant A, obciążenie $G=10$ kN
Fig. 5. Stress distribution t_{yx} – variant A, force $G=10$ kN



Rys. 6. Rozkład naprężeń t_{yz} – wariant A, obciążenie $G=10$ kN
Fig. 6. Stress distribution t_{yz} – variant A, force $G=10$ kN

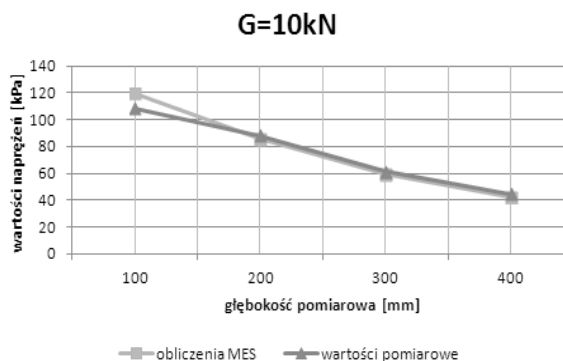
Analizie poddano wartości składowych naprężeń zarejestrowanych w osi kolejiny koła na następujących głębokościach pomiarowych: 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm. Na podstawie wyznaczonych za pomocą MES składowych naprężeń (s_y, t_{yx}, t_{yz}) obliczono wartości s_n zgodnie z zależnością (2).

WERYFIKACJA UZYSKANYCH WYNIKÓW OBLICZEŃ

Uzyskane wyniki obliczeń z wykorzystaniem MES porównano z wynikami laboratoryjnymi wykonanymi dla opony Stomil 14.9-28/8PR. Do analizy porównawczej wykorzystano wyniki badań laboratoryjnych zamieszczonych w [3].

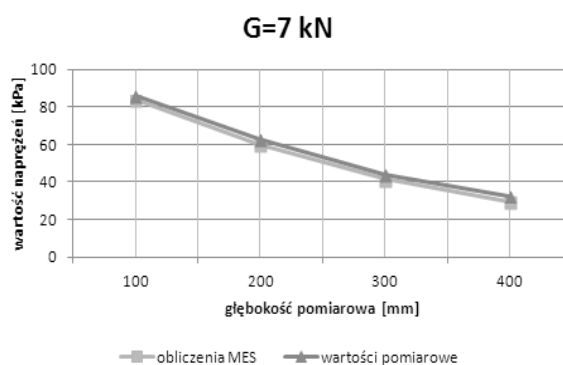
Wyniki pomiarowe i obliczone metodą MES wykazują istotne podobieństwo czego dowodem są wartości różnic względnych, które nie przekraczają $\pm 10\%$ na wszystkich głębokościach podłoża.

Aby poprawić dokładność obliczeń należy w dalszych badaniach zmodyfikować model dyskretny podłoża i współpracującej z nim opony, m.in. poprzez zastosowanie elementów izoparametrycznych. Kolejnym krokiem będzie budowa cyfrowych modeli czujników umieszczonych w modelu



Rys. 7. Porównanie obliczeń MES i wyników zarejestrowanych w badaniach laboratoryjno-polowych ($G=10$ kN)

Fig. 7. Comparison of FEM calculations with laboratory and field measurements ($G=10$ kN)



Rys. 8. Porównanie obliczeń MES i wyników zarejestrowanych w badaniach laboratoryjno-polowych ($G=7$ kN)

Fig. 8. Comparison of FEM calculations with laboratory and field measurements ($G=10$ kN)

podłoża, dzięki czemu, przy zastosowaniu metody obliczeń naprężeń kontaktowych, możliwe będzie dokładne odwzorowanie warunków laboratoryjnych, co w konsekwencji pozwoli na osiągnięcie większej zgodności wyników.

Tabela 2. Porównanie obliczeń MES z pomiarami laboratoryjnymi

Table 2. Comparison of FEM calculations with laboratory measurements

Głębokość [mm]	G=10kN			G=7kN		
	obliczenia MES σ_n [kPa]	wartości pomiarowe s_n [kPa]	różnica [%]	obliczenia MES σ_n [kPa]	wartości pomiarowe s_n [kPa]	różnica [%]
100	119,6	108,2	9,53%	83,7	85,6	2,27%
200	86,0	88,1	-2,44%	60,2	62,5	-3,82%
300	59,2	61,4	-3,72%	41,5	44,0	-6,02%
400	42,2	44,8	-6,16%	29,5	32,4	-9,83%

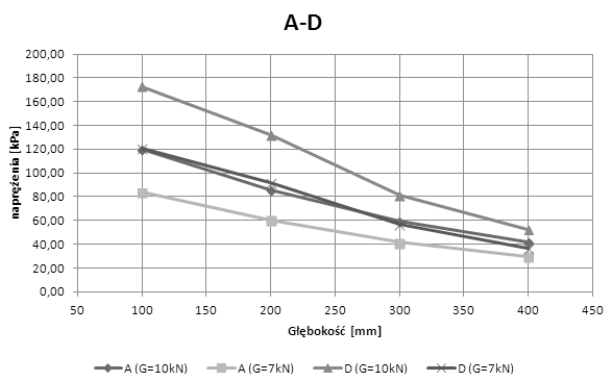
Tabela 3. Porównanie wartości naprężeń (A-D)

Table 3. Comparison of stress values (A-D)

wariant bieznika	A (łukowy)		D (daszkowy)		względny przyrost	
obciążenie	10 kN	7 kN	10 kN	7 kN	10 kN	7 kN
naprężenie σ_n	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]		
głębokość pomiarowa [mm]	100	119,60	83,70	172,90	120,70	30,83%
	200	86,00	60,20	132,20	91,90	34,95%
	300	59,20	41,50	81,50	57,00	27,36%
	400	42,20	29,50	52,70	36,50	19,92%

Uzyskane wyniki obliczeń MES pozwoliły na określenie wpływu geometrii bieżnika na wartości naprężeń powstałych w ośrodku glebowym. Analizę dokonano w dwóch obszarach. Określono wpływ rodzaju bieżnika oraz jego kąta nachylenia do kierunku osi jazdy na rozkład naprężeń.

Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla dwóch kształtów protektora: łukowego, warianty A, B, C, oraz daszkowego, warianty: D, E, F, (rys. 2). Dokonano porównania wartości naprężeń dla przypadku konstrukcji bieżnika o podobnym kącie pochylenia protektora (pary: A-D, B-E oraz C-F).



Rys. 9. Porównanie wartości naprężeń dla wariantów bieżnika A oraz D

Fig. 9. Comparison of stress values for A and D variants of tire treads

Porównanie wartości obliczonych naprężeń dla określonych kształtów bieżnika (łukowy i daszkowy) dowodzi, że:

- opony z bieżnikiem łukowym generują mniejsze naprężenia na każdej głębokości pomiarowej,
- względna różnica wartości naprężeń może dochodzić nawet do 35% na niekorzyść bieżnika daszkowego,
- odchylenie kąta bieżnika o $\beta = \pm 5^\circ$ zmniejsza względną różnicę naprężeń, która na głębokościach ($h=200$ mm oraz $h=400$ mm) nie przekracza 1%.

PROBLEMATYKA OPTIMALNEGO WYBORU KSZTAŁTU PROTEKTORA ZE WZGLĘDU NA MINIMALIZACJĘ WARTOŚCI NACISKÓW W GLEBIE

Na drodze obliczeń numerycznych wykazano, że opony z daszkowym kształtem bieżnika generują większe naprężenia w podłożu niż opony z bieżnikiem łukowym. Jest to spowodowane większą powierzchnią kontaktu z glebą protektora łukowego, co bezpośrednio wpływa na zmniejszenie nacisków powierzchniowych, a w konsekwencji zmniejszenie naprężeń na badanych głębokościach podłoża. Jednakże opony daszkowe mają oczywistą przewagę nad łukowymi ze względu na prostotę geometrii, a co za tym idzie tańszy proces technologiczny produkcji. Zaistniała zatem potrzeba znalezienia takiego kąta pochylenia protektora daszkowego β' , przy którym naprężenia generowane w podłożu byłyby najmniejsze [1], a nawet porównywalne z wynikami wyznaczonymi dla opon łukowych.

W tym celu wykonano następujące czynności:

- wyznaczono zależność postaci $\sigma = \sigma(\beta)$ dla wszystkich głębokości pomiarowych h i wartości obciążenia G z wykorzystaniem aproksymacji wielomianem drugiego stopnia o postaci:

$$\sigma = a\beta^2 + b\beta + c, \quad (3)$$

- dla każdego przypadku obliczeniowego wyznaczono wartość β' z równania:

$$\frac{d\sigma}{d\beta} = 0, \quad (4)$$

- obliczono wartość średnią $\beta'_{\text{śred}}$ dla wszystkich wyznaczonych wartości $\beta'(i)$ (i – numer obliczanego przypadku opisany w tabeli nr 13), zgodnie z zależnością:

$$\sigma'_{\text{śred}} = \frac{\sum_{i=1}^n \beta'(i)}{n}, \quad n=8 \quad (5)$$

- wyznaczono wartości naprężeń $\sigma(i)$ dla każdego przypadku obliczeniowego, zgodnie z zależnością:

$$\sigma(i) = a(i)\beta'^2_{\text{śred}} + b(i)\beta'_{\text{śred}} + c(i), \quad (6)$$

- porównano obliczone przy pomocy MES wartości σ z wartościami $\sigma(i)$.

Tabela 4. Porównanie wartości naprężeń wyznaczonych za pomocą MES dla bieżnika łukowego (wariant A) z wartościami $\sigma(\beta'_{\text{śred}})$ dla bieżnika daszkowego

Table 4. Comparison of stress values calculated using FEM method for tread arc (variant A) with $\sigma(\beta'_{\text{śred}})$ for herringbone tread

obciążenie G		10 kN		
		naprężenia	σ_{MES} [kPa]	$\sigma(\beta'_{\text{śred}})$ [kPa]
głębokość pomiarowa [mm]	100	119,60	167,76	28,71%
	200	86,00	130,06	33,88%
	300	59,20	80,80	26,73%
	400	42,20	52,43	19,51%
obciążenie G		7 kN		
		naprężenia	σ_{MES} [kPa]	$\sigma(\beta'_{\text{śred}})$ [kPa]
głębokość pomiarowa [mm]	100	83,70	117,29	28,64%
	200	60,20	89,95	33,07%
	300	41,50	56,73	26,85%
	400	29,50	36,20	18,51%

Opona z bieżnikiem daszkowym o optymalnym kącie nachylenia do osi jazdy generuje większe naprężenia w podłożu niż opona z łukowym zarysem protektora. Należy jednak zauważyć, że zmniejszyła się względna różnica naprężeń dla analogicznych obciążeń (G) i głębokości pomiarowych (h). Optymalny kąt nachylenia bieżnika daszkowego, przy którym propagacja naprężeń osiąga najmniejsze wartości, wyniósł **58,23°**.

Z powyższej analizy wynika, że geometria bieżnika ma znaczący wpływ na propagację naprężeń w podłożu. Określenie optymalnego kąta nachylenia bieżnika do kierunku osi jazdy pozwoli na zastosowanie opon o prostszej geometrii bieżnika, np. daszkowej bez znaczącego wzrostu wartości naprężeń w głębi ośrodka glebowego.

Celem sprawdzenia poprawności zaproponowanej metody wyznaczania optymalnej wartości kąta nachylenia bieżnika wykonano model cyfrowy koła dla wyznaczonego na drodze obliczeń aproksymacyjnych kąta $\beta=58,23^\circ$. Zgodnie z wcześniejszymi założeniami zadanie wykonano dla przypadku bieżnika daszkowego.

Za pomocą MES wyznaczono rozkład naprężeń w podłożu dla ustalonych głębokości pomiarowych h_i (100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm) oraz wartości obciążenia osi koła G (7kN, 10 kN). W tabeli nr 6 przedstawiono wartości naprężeń zredukowanych, obliczonych zgodnie z zależnością (2) dla składowych naprężeń obliczonych za pomocą MES ($\beta=58,23^\circ$) oraz wyznaczonych metodą aproksymacji (tabela nr 5).

Tabela 5. Porównanie wartości naprężeń wyznaczonych za pomocą MES oraz obliczonych wg funkcji aproksymującej
Table 5. Comparison of stress values calculated using FEM method with calculated approximating function

rodzaj obliczeń	MES	Aproksymacja	różnica względna	
obciążenie G	7 kN			
głębokość pomiarowa [mm]	100 mm	121,76	117,29	3,67%
	200 mm	89,53	89,95	-0,47%
	300 mm	56,41	56,73	-0,57%
	400 mm	36,13	36,20	-0,18%
obciążenie G	10 kN			
głębokość pomiarowa [mm]	100 mm	174,65	167,76	3,94%
	200 mm	128,19	130,06	-1,46%
	300 mm	80,59	80,80	-0,27%
	400 mm	51,20	52,43	-2,40%

Różnica względna uzyskanych wyników obliczeń zaproponowanymi dwoma metodami (MES, aproksymacja) nie przekracza 4%. Należy zatem stwierdzić, że wyznaczona wartość kąta β , przy którym naprężenia osiągają najmniejsze wartości na badanych głębokościach pomiarowych została pozytywnie zweryfikowana przy pomocy obliczeń MES.

WNIOSKI

Analiza obliczeń teoretycznych wykazała podobieństwo uzyskiwanych wartości naprężeń z uzyskanymi na drodze badań empirycznych, wykonywanych zarówno w warunkach laboratoryjnych (kanał glebowy) jak i warunkach polowych przeprowadzonych w Federal Research Centre – Braunschweig [13]. Wyniki obliczeń MES wykazują dodatkowo, że:

- kształt bieżnika ma wpływ na propagację naprężeń w podłożu, przy czym opony z bieżnikiem łukowym generują mniejsze wartości naprężeń od opon z bieżnikiem daszkowym,
- na wartość naprężeń istotny wpływ ma parametr określający kąt nachylenia bieżnika do osi jazdy,
- istnieje możliwość wyznaczenia wartości kąta nachylenia bieżnika, przy którym wartości naprężeń gene-

- rowanych przez dany typ opony będą najmniejsze na badanych głębokościach pomiarowych
- wyznaczony rozkład wartości naprężeń dla badanych przypadków opon odpowiada matematycznemu modelowi teoretycznemu, który opisuje proces rozprzestrzeniania się naprężeń w głąb ośrodka glebowego.
- Zastosowanie systemów CAD oraz metod symulacji cyfrowej i obliczeń MES w omawianej problematyce daje wymierne korzyści, do których należą m.in.:
 - znaczne skrócenie czasu wykonywanych badań i uniezależnienie procesu badawczego od warunków pogodowych i klimatycznych,
 - odciążenie zespołu badawczego od prac zrutynizowanych i nietwórczych – czasochłonne przygotowywanie stanowisk badawczych i pracochłonna analiza uzyskanych wyników,
 - ułatwienie wykonania analizy porównawczej badanych opon oraz rodzajów podłoża,
 - przeprowadzenie wiarygodnych badań z wykorzystaniem systemów komputerowych jeszcze w fazie projektowania opony i układu napędowego, bez konieczności wykonywania kosztownych i czasochłonnych badań laboratoryjnych,
 - wprowadzenie cech konstrukcyjnych bieżnika, które zapewnią najmniejsze z możliwych naciski układu jezdni na glebę i ich propagację w głąb ośrodka.

LITERATURA

1. **Bogucki M. 2009:** Optymalizacja doświadczalna. Wariant jednokryterialny, MOTROL Motorization and power industry of agriculture, volume 13, Komisja Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN Oddział w Lublinie, 11c, 22-30.
2. **Jakliński L. 2006:** Mechanika układu pojazd-teren w teorii i badaniach. Wybrane zagadnienia, OWPW.
3. **Jakliński L. 1999:** Modele oddziaływania koła pneumatycznego na glebę, OWPW.
4. **Jakliński L., Malesa W. 2011:** „Zastosowanie systemów CAD w procesie modelowania cyfrowego układu pojazd-teren”, Inżynieria Mechaniczna Innowacje dla Przedsiębiorstw, Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii w Płocku, Instytut Inżynierii Mechanicznej, Płock, 53-62.
5. **Jakliński L., Malesa W. 2011:** Model współpracy opony z glebą z zastosowaniem metody elementów skończonych z uwzględnieniem naprężeń kontaktowych, Mechanik 12/2011, 989-990.
6. **Kolator B. 2006:** Wybrane zagadnienia odkształceń napędowego koła pneumatycznego ciągnika rolniczego, MOTROL Motorization and power industry of agriculture, volume 13, Komisja Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN Oddział w Lublinie, 8, 118-124.
7. **Król K. 2006:** Metoda elementów skończonych w obliczeniach konstrukcji, Politechnika Radomska, Wydawnictwo.
8. **Kruszewski J., Gawroński W., Wittbrodt E., Najbar F., Grabowski S. 1975:** Metoda sztywnych elementów skończonych, Arkady.

9. **Kruszewski Z., Jakliński L. 1990:** Badania porównawcze opon napędowych do ciągników rolniczych 14.9-28 8PR „Stomil” i „Good Year”, Sprawozdanie z pracy zleconej przez OZOS Stomil, Płock.
10. **Pytko J., Szymaniak G. 2004:** Investigations of stress state in soil under Tractor tyres, Teko Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa IV/2004, 172, Wydawnictwo Oddziału PAN w Lublinie,
11. **Rakowski G., Kacprzyk Z. 2005:** Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji, OWPW.
12. **Sołtyński A. 1966:** Mechanika układu pojazd-teren, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej,.
13. **Sommer C., Lebert M., Jakliński L., Jasiński B. 2003:** Bodenschadverdichtung Strategien und physikalischen Bodenschutz. Landtechnik no. 2.
14. **Stasiak W. 2008:** Analiza modeli opisujących rozkład naprężeń w glebie, Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, Poznań, vol. 53 (2), 39-43.
15. **Stasiak W. 2003:** Modele propagacji nacisków w glebie generowanych przez oponę, praca doktorska, PW Płock.
16. **Szmelter J., Dacko M., Dobrociński S., Wiczorek M. 1979:** Metoda elementów skończonych w statyce konstrukcji. Przykłady obliczeń, Arkady.
17. **Szymaniak G., Pytko J. 2003:** Effects of reduced inflation pressure and ride velocity on soil surface deformation, Teko Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa III/, 236, Wydawnictwo Oddziału PAN w Lublinie.
18. **Zabielski M., Malesa W. 2012:** Calculation of stress in contact of tire-soil with use of fem (finite element method), TEKA Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol. 12., No. 2.
19. **Zagrajek. T., Krzesiński G., Marek P. 2006:** Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Ćwiczenia z zastosowaniem systemu ANSYS, OWPW.
20. **Zienkiewicz O.C. 1972:** Metoda elementów skończonych, Arkady.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SELECTED
SHAPES OF PNEUMATIC MECHANISM CHASSIS
PROTECTORS IN VIEW OF STRESS PROPAGATION
IN SOIL WITH USE OF FEM

Summary. This article presents the application of CAD systems with the use of the finite element methods (FEM), in comparative analysis of selected shapes of pneumatic mechanism chassis protectors in view of stress propagation in soil. A distribution model of surface pressures was developed as well as calculation of stress in the soil. The obtained theoretical findings resulted in a comparative analysis of the value of designated stress with those obtained through empirical studies in the laboratory. Optimization of selected geometrical features of chevron protector was carried out in view of minimization of stress propagation in soil.

Key words: tire-soil interaction, computer aided design, finite element method, contact stress, stresses in soil, optimization.