

Mariusz WESOŁOWSKI, Paweł IWANOWSKI, Paweł PIETRUSZEWSKI,
Piotr WŁODARSKI
Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)

TESTS AND ASSESSMENT OF THE CONTACT SURFACE OF SELECTED MEASURING TIRES OF FRICTION TESTERS WITH THE AIRPORT SURFACE DEPENDING ON CHANGES IN PRESSURE AND LOAD

Badania i ocena powierzchni kontaktu wybranych opon pomiarowych testerów tarcia z nawierzchnią lotniskową w zależności od zmian ciśnienia i siły nacisku

Abstract: *The basis of the work was to estimate the relationship between wheel pressure and wheel pressure on the surface, and the size of the contact surface. The article presents world experience in the field and presents the theoretical basis for calculating the contact area of a wheel with the road surface. The tests were carried out for two types of tires - ASTM E-1551 and ASFT T520. The tests proved a significant influence of the wheel pressure value and wheel pressure on the surface on the obtained surface area of the wheel contact with the surface.*

Keywords: airfield pavements, friction tester tire, tire-surface contact area, skid resistance

Streszczenie: *Podstawą pracy było oszacowanie relacji między ciśnieniem w kole oraz naciskiem koła na nawierzchnię a wielkością pola powierzchni styku. W artykule przytoczono światowe doświadczenia w przedmiotowym zakresie oraz przedstawiono teoretyczne podstawy obliczania pola powierzchni styku koła z nawierzchnią. Badania prowadzono dla dwóch typów opon – ASTM E-1551 oraz ASFT T520. Badania dowiodły istotny wpływ wartości ciśnienia w kole oraz nacisku koła na nawierzchnię na uzyskane pole powierzchni styku koła z nawierzchnią.*

Słowa kluczowe: nawierzchnie lotniskowe, opona pomiarowa testera tarcia, powierzchnia styku opona–nawierzchnia, właściwości przeciwpoślizgowe

1. Introduction

The contact area of the aircraft's main wheels with the surface is important for performing air operations in the ground maneuvering area. This aspect is important for both artificial and natural surfaces. By contacting the tire with artificial turf, forces from the aircraft are transferred to the ground. The correct transfer of these forces guarantees the safety of flight operations, and thus the safety of crew and passengers. The parameters of the plane's contact surface with the surface are of great importance for the formation of friction forces between the tire and the surface. Ensuring the anti-skid properties of the pavement at the appropriate level allows to maintain the correct trajectory of the aircraft and the proper transfer of braking forces to the pavement. For this reason, airport pavements are constantly monitored due to the current state of anti-skid properties. The measurements are made with devices for the friction coefficient continuous measurement with the pneumatic tire. This article focuses on two types of tires: T520 and E1551.

Research on pavement response to wheel load has been conducted for many years. Already in 1989 [12] the impact of tire pressure and its type on the response of a flexible surface. They included three types of tires in their tests: radial, diagonal and broad-profile radial, and performed tests for three pressure levels. They proved that each of the factors presented has a significant impact on the stress formation and deformation in the pavement.

The wheel-surface contact surface tests themselves were conducted by [6]. Researchers looked at a standard 11R22-5 tire for trucks. The research was carried out using the Heavy Vehicle Simulator (HVS) Mark VI. The finite element method (FEM) was also used for the analysis, based on the results obtained from the research. The results of the analysis confirmed that for a given pressure, the contact surface decreased with the tire pressure increase. They conducted similar tests [5]. They tested two tires for trucks. The tests were carried out using five different values of vertical load in the range from 26.6 kN to 79.9 kN, and four values of pressure in the wheel in the range from 552 kPa to 862 kPa. The analysis was conducted in the context of pavement damage resulting from incorrect tire pressure values and axle loads exceeding the permissible values.

In [15], research was presented aimed at linking the tire-road contact surface area with the pavement anti-skid parameter. In their work, researchers determined the actual contact surface of a tire fragment with three-dimensional pavement models reflecting nearly 30 different pavements with different texture depth values of pavement. The tests were carried out on a micro scale and did not include the wheel pressure. However, they relatively faithfully reflected the influence of the pavement texture parameter on its anti-skid properties. The researchers compared the obtained contact surface results with the actual friction coefficient results determined with the T2Go device. The author [4] also conducted tests of the wheel-road contact area in the context of driving safety. The work emphasizes the impact of improper wheel pressure on the deterioration of the vehicle's driving characteristics, the effectiveness of braking systems, traction control systems and reduced ride comfort. Although the work [4] does not say anything directly about the contact surface of the wheel with the surface, it shows many negative aspects related to improper tire

pressure, which translates into incorrect adhesion of the tire to the surface, and thus to deterioration in traction. They conducted similar studies [7]. They focused on the effect of normal load on friction coefficient values at the contact surface of rubber and rough surface. They have developed a model that simply reflects the real contact surface and stress at the contact of two surfaces. In [13], attention was paid to the problem of incorrect tire pressure and the impact of the phenomenon on the results of diagnostics of the braking system and suspension. In their research, it was noticed that at low measuring speeds of 5–7 km / h, the tire pressure does not significantly affect the braking forces obtained on the rollers. Although, as in the case of [4], the wheel-surface contact surface was not tested, it was indicated that changes in pressure in the wheel significantly change its traction parameters. Also [11] studied the effect of pressure and temperature on the obtained friction coefficient values. Both the finite element method and experimental experiments were used for the analysis. It was proved that as the temperature increased, the friction coefficient decreased. A similar situation occurred in the case of pressure, where the friction coefficient decreased with its increase.

In [14], the problem of the wheel-pavement contact surface was considered in a mechanistic way and the stress on the wheel-pavement contact was determined using the finite element method. The analysis was carried out in a static manner, which means that the stresses were determined under the wheel under equilibrium conditions. At the time of publication of the work [14], it was not possible to measure forces under a wheel rolling at high speed due to their complicated spatial distribution. The Euler - Lagrangian model was used for the calculations. The stress distribution in three directions was determined and significant influence of load, tire pressure and anti-skid properties of the pavement on its parameters was proved. Work was carried out in the context of early diagnosis of pavement damage. Works on assessing pavement response to a typical, double or single truck tire load were conducted by [8]. In their research, they used three-dimensional stress distribution in a truck-loaded structure. They have proven that overloaded trucks with incorrect wheel pressure can cause significant damage to the road surface. The same authors also considered the use of stress at the contact of the wheel with the pavement in the design of road pavements, based on its life expectancy [3]. Similar studies were conducted by [3] who in their work presented an assessment of the impact of tire size and wheel pressure on the stress on the surface of the wheel-surface contact. Whereas [2] examined the stress at the interface near the pavement under a moving wheel. The purpose of his work was to develop a method enabling this type of measurement. The stress distribution under the wheel was also analyzed in [10]. The research was conducted in the context of highway pavement damage by wide truck wheels. It has been shown that in the shallow layers of the pavement large spikes of stress caused by overloaded vehicles are possible.

In order to assess the impact of the pressure and impact forces of the measuring tire on the airport pavement, the authors developed an auxiliary method for determining the actual contact surface area of the wheel with the pavement. Using two types of measuring tires, a model illustrating the actual contact surface area of the wheel with the road was

determined under different pressure and load conditions. The article presents the differences between theoretical models and results of tests in laboratory conditions.

The following sections will present the measurement method used, the measurement stand and the results of the tests carried out. Finally, the authors will summarize the conducted experimental research and present the conclusions of their analysis.

2. Research

2.1. Theoretical basics

The method of calculating the surface contact area of the wheels with the surface is not clear. Various formulas can be found in the literature on the basis of which it is possible to determine the above area. Such patterns presented in their monographs include [9]. A common and simplest formula is (1):

$$F = \frac{P}{p}, \quad (1)$$

where:

F – tire-surface contact area [m²],

P – vertical load [N],

p – tire pressure [Pa].

This is a simple formula that doesn't take into account many factors. However, with high accuracy it allows an approximate determination of the size of the contact surface of the wheel with the road surface and is a quick solution with undemanding calculations. The next formula cited in the literature is as follows (2):

$$F = (0,75 + 0,005 \times D) \times \frac{P}{p}, \quad (2)$$

where:

F – tire-surface contact area [m²],

P – vertical load [N],

p – tire pressure [Pa],

D – tire diameter [cm].

This formula, apart from the parameters quoted in the formula (1), also takes into account the size of the wheel in the form of its diameter. The value $(0.75 + 0.005 \times D)$ is called the tire load factor and corrects the surface area by about 10–12% [9]. This gives a closer picture of the actual contact surface. The designs presented here do not take into account the type of tire (radial or diagonal), the retreading method (smooth, smooth-

retreaded or retreaded), as well as the shape of the tire. Tires with a contact surface similar to a rectangle and those whose contact surface is shaped as an ellipse are produced. In addition, rubber hardness and measurement temperature can also affect the final size of the contact surface.

2.2. Procedure description

Measurements were made in laboratory conditions, maintaining repeatability conditions. The test consisted of exerting a controlled force on a wheel with a fixed pressure through a non-deformable plate. A contrast was applied to the tire in the form of a mixture of waxes and lanolin with a black dye, and a A3 paper screen was placed between the wheel and the plate. Each sheet was marked with the tire reference number, wheel pressure and force applied. While the disc pressed against the wheel, the contrast was reflected on the screen creating a trace of the contact surface in the form of a negative. A proprietary test stand was built to perform the measurement. For this purpose, a non-deformable frame was made of thick-walled steel C-profiles, which is shown in fig. 1.

The frame has locks at the top for mounting the measuring wheel. The measuring wheel was bolted to specially prepared hubs mounted on a steel rod with a diameter of 50 mm. A hydraulic cylinder with a digital manometer is located at the bottom of the frame. The pressure gauge was previously calibrated in a testing machine, resulting in a correlation of the pressure gauge indications (in MPa) to the force exerted by the actuator in (kN).

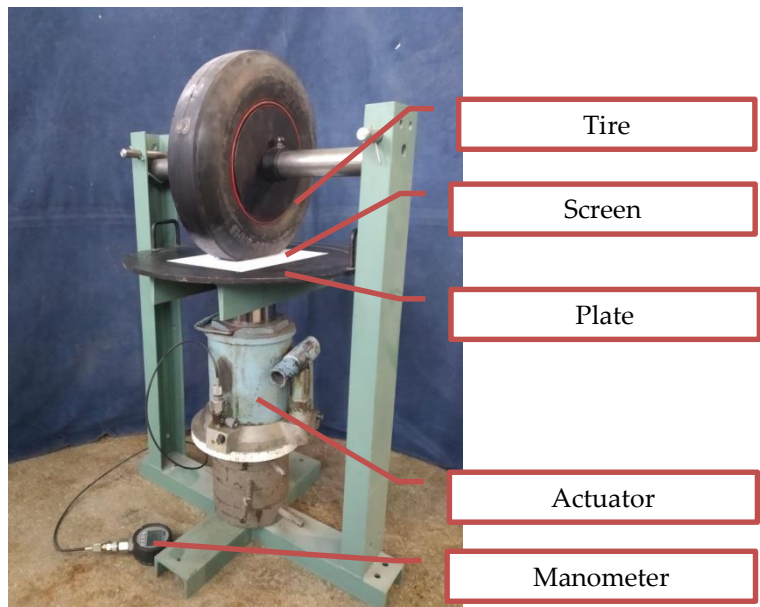


Fig 1. View of the test stand

The next steps of the procedure are as follows:

- 1) Placing the wheel on the test bench,
- 2) Applying pressure in the wheel to the set value,
- 3) Putting contrast on the wheel,
- 4) Placing a blank screen between the wheel and the plate,
- 5) Exerting wheel pressure on the plate with a given force.

Steps 2 to 5 were repeated for different values of tire pressure and pressure values. Screens with a reflected trace of the contact surface were placed in plastic shirts to minimize the possibility of damage.

The negatives obtained as a result of the test were scanned at a resolution of 600 dpi in jpg format. Then scans made in AutoCAD in the form of a stroke were attached. The stroke was scaled to the actual dimensions, as a result of which the unit of the length of the scanned wheel trace corresponded to the unit of the drawing length. In the program, a contour of the scanned contact trace was created and its area was calculated using the functions available in the program. The outline was created several times, and the final result was the average of individual surface measurements. In this way, the impact of the error associated with the correct creation of the contour of the scanned contact trace was minimized.

2.3. Results

The measurements were made for two different types of tires (T520 type and ASTM E-1551 type) used in devices for the friction coefficient continuous measurement for airport pavements. Tire pressure was determined on the basis of tire parameters and tire operating pressure values. The tires were tested with pressure in the range from 210 kPa to 700 kPa, in 70 kPa steps in the measuring wheel. Values of wheel pressure on the plate were determined based on the service load of individual wheel types. These values ranged from 0.8 kN to 4 kN.

As a result of the measurements, 83 traces of the wheel contact surface with the road surface were obtained. Some combinations of tire pressure and pressure on the surface could not be tested for safety reasons. An example of a scanned negative is shown in fig. 2.



Fig. 2. Negative tire-surface contact area for the T520 tire

Each of the scanned negatives of the tire contact trace with the pavement was outlined in the AutoCAD envelope. Then, the surface area was obtained from the geometric figure thus formed. The envelopes were created several times for the same circle and measurement conditions, and the results were averaged. The results are presented in tabs. 1 and 2 and partly in figs. 3 and 4 in the form of diagrams of the contact surface area of the wheels with the road surface depending on the pressure. Each graph corresponds to a specific, selected pressure in the wheel. In addition, each graph shows the theoretical values of the contact surface area resulting from formulas (1) and (2). The graphs are designated as equation (1) and equation (2) respectively.

Table 1

Surface area values obtained as a result of testing the ASFT device smooth tire ASTM (results in mm²)

Load		0,8	1,4	2	2,5	3	4
		kN					
210	kPa	2 685	2 938	4 628	5 561	6 256	7 371
280		2 069	3 391	4 084	4 957	5 674	-
350		2 293	3 178	3 975	4 555	5 058	-
420		2 129	3 201	3 762	4 420	4 957	-
490		2 366	2 816	3 636	4 306	4 763	-
560		2 157	2 974	3 606	3 923	4 671	-
630		2 287	3 262	3 509	3 949	4 413	-
700		2 276	2 918	3 304	3 930	4 393	5 037

Table 2

Surface area values obtained as a result of testing the ASFT device T520 tread tire (results in mm²)

Pressure	Load	0,8	1,4	2	2,5	3	4
	kN						
210	kPa	3 117	5 108	6 064	7 241	8 398	-
280		3 091	4 845	5 582	6 466	7 291	-
350		3 043	4 510	5 491	5 890	6 727	-
420		3 029	4 275	5 045	5 599	6 184	-
490		2 686	4 169	4 923	5 264	6 130	-
560		2 552	4 026	4 750	5 189	5 728	-
630		2 359	3 661	4 360	5 023	5 555	-
700		2 066	3 259	4 354	4 816	5 383	6 315

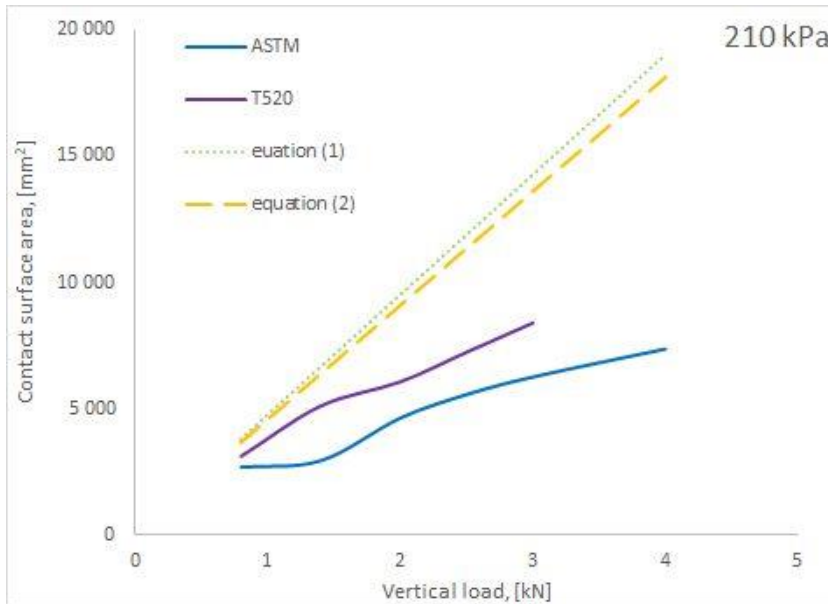


Fig. 3. Contact surface area of friction tester tires with road surface depending on wheel pressure load of 210 kPa

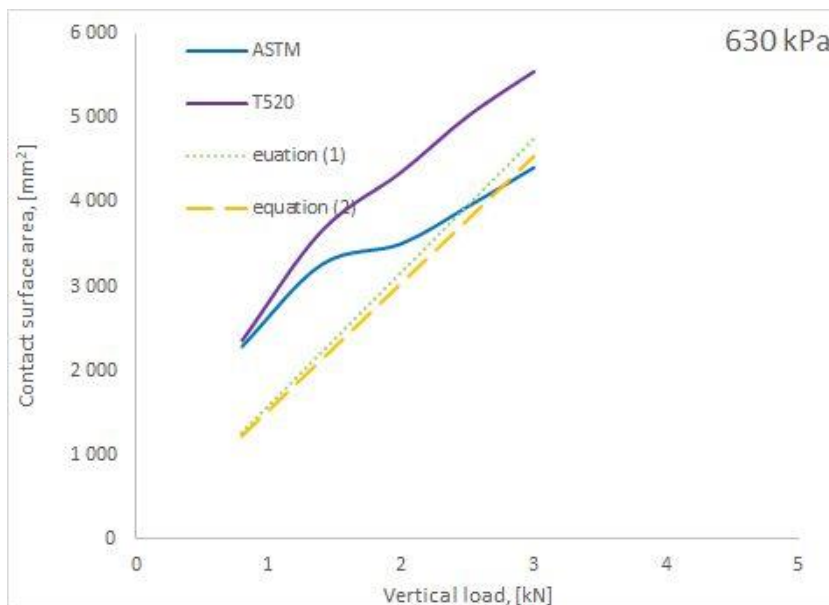


Fig. 4. Contact surface area of friction tester tires with road surface depending on wheel pressure load of 630 kPa

3. Conclusion

Studies of the contact surface of a tire with a road surface have been conducted for many years in a variety of contexts. Researchers analyzed the impact of tire pressure on the stress formation in the pavement, the contact surface of a car tire was studied depending on the load. The contact surface was also looked at in terms of the anti-skid properties of the pavement. Such a varied approach to the phenomenon presented in the article shows how important the contact of an aircraft tire with the airfield surface is.

The authors of this work presented the results of a study of the relationship between the contact area of selected measuring friction testers tires, and the wheel pressure on the surface and the pressure value in the wheel. The study included two of the world's most-used tires from airport pavement friction testers - the T520 smooth tread tire and the ASTM E-1551 smooth tire.

Analyzing the results presented above, it should be noted that in no case did the results of the wheel-surface contact area obtained during the test coincide with the theoretical values obtained according to formulas (1) and (2). It should be pointed out that in each case the contact surface area of the wheel with the surface increased with increasing pressure. The dependence of the surface area on the wheel pressure was the opposite. As the pressure in the wheel increased, the surface area decreased.

The relationship between vertical load and wheel pressure and contact surface is not clear. Both tires tested have the same dimensions and according to formula (2) they should present the same contact area values for the same measurement conditions. In fact, the T520 tire generates a smaller contact area than the ASTM tire. In addition, at a wheel pressure of 350 - 420 kPa, the values obtained in the study are close to the theoretical values created according to formulas (1), (2). At lower pressure, the contact surface obtained is less than theoretical, while at higher pressure, the contact surface exceeds the theoretical values.

The obtained test results at the designed test stand suggest that the contact tire surface with the ground surface is influenced by factors other than just the vertical load and pressure in the wheel. This allows to conclude that apart from vertical load, wheel pressure and tire diameter, there are other factors determining the actual size of the contact surface of the aircraft wheel with the ground surface.

4. References

1. De Beer M.: Measurement of tyre/pavement interface stresses under moving wheel loads. CSIR Roads and Transport Technology: Pretoria, South Africa, 1994.
2. De Beer M., Maina J.W., van Rensburg Y., Greben J.M.: Toward using tire-road contact stresses in pavement design and analysis. *Tire Science and Technology*, 40(4), 2012.
3. Elfasakhany A.: Tire pressure checking framework: A review study. *Reliability Engineering and Resilience*, 1(1), 2019.
4. Hernandez J.A., Al-Qadi I., De Beer M.: Impact of tire loading and tire pressure on measured 3D contact stresses. *Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements*, ASCE 2013.
5. Leiva-Villacorta F., Vargas-Nordcbeck A., Aguiar-Moya J.P.: Loria-Salazar. Influence of tire footprint area and pressure distribution on pavement responses. [In:] J.P. Aguiar-Moya (ed.): *The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability*; Springer International Publishing: Switzerland, 2016.
6. Maegawa S., Itoigawa F., Nakamura T.: Effect of normal load on friction coefficient for sliding contact between rough rubber surface and rigid smooth plane. *Tribology International*, No. 92, 2015.
7. Maina J., De Beer M.: Improved performance evaluation of road pavements by using measured tyre loading. *Science real and relevant: 2nd CSIR Biennial Conference, CSIR International Convention Centre Pretoria*, 2008.
8. Nita P.: *Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych*. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2008.
9. Perdomo D., Nokes B.: Theoretical analysis of the effects of wide-base tires on flexible pavements using CIRCLY. *Rigid and Flexible Pavement Design and Rehabilitation (Pavement Design, Management and Performance)*, 1388, 1993.

10. Rosu I., Elias-Birembaux H.L., Lebon F., Lind H., Wangenheim M.: Experimental and numerical simulation of the dynamic frictional contact between an aircraft tire rubber and a rough surface. *Lubricants*, 4(29), 2016.
11. Sebaaly P., Tabatabaee N.: Effect of tire pressure and type on response of flexible pavement. *Transportation Research Board*, 1227, 1989.
12. Toma M., Andreescu C., Stan C.: Influence of tire inflation pressure on the results of diagnosing brakes and suspension. *Procedia Manufacturing*, No. 22, 2018.
13. Yang W., Tiecheng S., Yongjie L., Chundi S.: Prediction for tire-pavement contact stress under steady-state conditions based on 3D finite element method. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 9(4), 2016.
14. Yun D., Hu L., Tang C.: Tire-Road contact area on asphalt concrete pavement and its relationship with the skid resistance. *Materials*, 13(615), 2020.

BADANIA I OCENA POWIERZCHNI KONTAKTU WYBRANYCH OPON POMIAROWYCH TESTERÓW TARCIA Z NAWIERZCHNIĄ LOTNISKOWĄ W ZALEŻNOŚCI OD ZMIAN CIŚNIENIA I SIŁY NACISKU

1. Wprowadzenie

Strefa kontaktu kół goleni statku powietrznego z nawierzchnią ma istotne znaczenie dla wykonywania operacji lotniczych w naziemnym polu manewrowym. Aspekt ten jest ważny zarówno w przypadku nawierzchni sztucznych, jak i nawierzchni naturalnych. Poprzez kontakt opony z nawierzchnią sztuczną przenoszone są siły pochodzące od statku powietrznego na podłoże. Poprawne przenoszenie tych sił gwarantuje bezpieczeństwo prowadzenia operacji lotniczych, a co za tym idzie bezpieczeństwo załogi i pasażerów. Parametry powierzchni kontaktu opony samolotu z nawierzchnią mają istotne znaczenie przy powstawaniu sił tarcia między oponą a nawierzchnią. Zapewnienie właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni na odpowiednim poziomie pozwala na zachowanie poprawnej trajektorii statku powietrznego oraz właściwe przeniesienie sił hamowania na nawierzchnię. Z tego powodu nawierzchnie lotniskowe są stale monitorowane ze względu na aktualny stan właściwości przeciwpoślizgowych. Pomiaru wykonywane są urządzeniami do ciągłego pomiaru współczynnika tarcia, które wykorzystują oponę pneumatyczną. W niniejszym artykule skupiono uwagę na dwóch rodzajach opon: T520 oraz E1551.

Badania nad odpowiedzią nawierzchni na obciążenie kołem prowadzone są od wielu lat. Już w 1989 r. [12] badano wpływ ciśnienia w oponie oraz jej typu na odpowiedź nawierzchni podatnej. Autorzy uwzględnili w badaniach trzy typy opon: radialną, diagonalną oraz radialną o szerokim profilu, a testy wykonali dla trzech poziomów ciśnienia. Udowodnili, że każdy z przedstawionych czynników ma istotny wpływ na kształtowanie się naprężeń oraz odkształceń w nawierzchni.

Same badania powierzchni styku koło–nawierzchnia były prowadzone przez [6]. Badacze wzięli pod lupę standardową oponę typu 11R22-5 przeznaczoną do samochodów ciężarowych. Badania prowadzono z wykorzystaniem Heavy Vehicle Simulator (HVS) Mark VI. Do analizy również wykorzystano metodę elementów skończonych (MES), bazując na wynikach uzyskanych z badań. Wyniki analizy potwierdziły, że dla zadanego ciśnienia, wraz ze wzrostem ciśnienia w oponie powierzchnia styku ulegała zmniejszeniu. Podobne badania przeprowadzili autorzy pracy [5]. Przebadali dwie opony przeznaczone

dla samochodów ciężarowych, stosując pięć różnych wartości obciążenia pionowego w przedziale od 26,6 kN do 79,9 kN, oraz czterech wartości ciśnienia w kole w przedziale od 552 kPa do 862 kPa. Analizę prowadzono w kontekście uszkodzeń nawierzchni wynikających z niewłaściwych wartości ciśnienia w oponie oraz obciążenia osi przekraczających dopuszczalne wartości.

W [15] przedstawiono badania mające na celu powiązanie powierzchni kontaktu opona–droga z parametrem właściwości przeciwoślizgowych nawierzchni. W swojej pracy badacze określali rzeczywistą powierzchnię styku fragmentu opony z trójwymiarowymi modelami nawierzchni odzwierciedlającymi blisko 30 różnych nawierzchni posiadających powierzchnie o różnych wartościach głębokości tekstury. Badania prowadzone były w skali mikro i nie uwzględniały wartości ciśnienia w kole. Natomiast stosunkowo wiernie odzwierciedliły wpływ parametru tekstury nawierzchni na jej właściwości przeciwoślizgowe. Uzyskane wyniki powierzchni styku badacze porównywali z rzeczywistymi wynikami współczynnika tarcia określanymi urządzeniem T2Go. Autor pracy [4] również prowadził badania powierzchni styku koło–droga w kontekście bezpieczeństwa prowadzenia pojazdów. Uwypuklił on wpływ niewłaściwego ciśnienia w kole na pogorszenie właściwości jezdnych pojazdu, efektywność systemów hamulcowych, systemów kontroli trakcji oraz obniżenia komfortu jazdy. Mimo iż praca [4] nie mówi nic bezpośrednio o powierzchni styku koła z nawierzchnią, to pokazuje wiele negatywnych aspektów związanych z niewłaściwym ciśnieniem w oponie, co przekłada się na niepoprawne przyleganie opony do nawierzchni, a co za tym idzie na pogorszenie właściwości trakcyjnych. Podobne badania prowadzili autorzy pozycji [7]. Skupili się oni na wpływie obciążenia normalnego na wartości współczynnika tarcia na powierzchni styku gumy i szorstkiej powierzchni. Opracowali model, który w prosty sposób odzwierciedla rzeczywistą powierzchnię styku oraz naprężenia na styku dwóch powierzchni. W pracy [13] zwrócono uwagę na problem niewłaściwego ciśnienia w oponie oraz wpływ zjawiska na wyniki diagnostyki układu hamulcowego oraz zawieszenia. W badaniach zauważono, iż przy niskich prędkościach pomiarowych, rzędu 5–7 km/h, ciśnienie w oponie nie wpływa znacząco na siły hamowania uzyskiwane na rolkach. Mimo że jak w przypadku [4] nie badano powierzchni styku koło–nawierzchnia, to wskazano, iż zmiany ciśnienia w kole istotnie zmieniają jego parametry trakcyjne. Także autorzy pracy [11] badali wpływ ciśnienia oraz temperatury na uzyskiwane wartości współczynnika tarcia. Do analizy wykorzystano zarówno metodę elementów skończonych, jak i doświadczenia eksperymentalne. Udowodniono, że wraz ze wzrostem temperatury współczynnik tarcia malał. Podobna sytuacja miała miejsce w przypadku ciśnienia – wraz z jego wzrostem spadała wartość współczynnika tarcia.

W artykule [14] rozważano problem powierzchni kontaktu koło–nawierzchnia, w sposób mechanistyczny i wykorzystując metodę elementów skończonych wyznaczono naprężenia na styku koło–nawierzchnia. Analiza prowadzona była w sposób statyczny, co oznacza, że naprężenia wyznaczane były pod kołem w warunkach równowagi. W momencie wydania pracy [14] nie było możliwości pomiaru sił pod kołem toczącym się z wysoką prędkością z uwagi na ich skomplikowany rozkład przestrzenny. Do obliczeń

wykorzystano model Euler–Lagrangian. Wyznaczono rozkład naprężeń w trzech kierunkach i udowodniono istotny wpływ obciążenia, ciśnienia w oponie oraz właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni na jego parametry. Prace prowadzono w kontekście wczesnego diagnozowania uszkodzeń nawierzchni. Prace nad oceną odpowiedzi nawierzchni na obciążenie typową, podwójną lub pojedynczą oponą samochodu ciężarowego prowadzili autorzy pozycji [8]. Posłużyli się w swoich badaniach trójwymiarowym rozkładem naprężeń w konstrukcji obciążonej kołem samochodu ciężarowego. Dowiedli, że przeładowane samochody ciężarowe z niewłaściwym ciśnieniem w kole mogą powodować istotne uszkodzenia powierzchni drogi. Ci sami autorzy rozpatrywali również użycie naprężeń na styku koła z nawierzchnią w projektowaniu nawierzchni drogowych, w oparciu o jej długość życia [3]. Analogiczne badania prowadzone były przez autorów [3], którzy w swojej pracy przedstawili ocenę wpływu rozmiaru opony i ciśnienia w kole na naprężenia na powierzchni styku koło–nawierzchnia. Natomiast autorzy pracy [2] badali naprężenia na styku koło–nawierzchnia pod poruszającym się kołem. Celem pracy było opracowanie metody umożliwiającej tego typu pomiary. Rozkład naprężeń pod kołem analizowano także w pozycji [10]. Badania prowadzono w kontekście uszkodzeń nawierzchni autostrad przez szerokie koła samochodów ciężarówek. Wykazano, że w płytkich warstwach nawierzchni możliwe są duże skoki naprężeń spowodowanych przeładowanymi pojazdami.

W celu oceny wpływu ciśnienia i sił oddziaływania opony pomiarowej na nawierzchnię lotniskową autorzy opracowali pomocniczą metodę określenia rzeczywistej powierzchni styku koła z nawierzchnią. Wykorzystując dwa rodzaje opon pomiarowych, w różnych warunkach ciśnienia i obciążenia, ustalony został model obrazujący faktyczną powierzchnię styku koła z nawierzchnią. W artykule zostaną przedstawione różnice między modelami teoretycznymi a wynikami badań w warunkach laboratoryjnych.

W dalszej części pracy zaprezentowana zostanie zastosowana metoda pomiarowa, stanowisko pomiarowe oraz wyniki zrealizowanych badań. Na końcu autorzy podsumują przeprowadzone badania doświadczalne oraz przedstawią wnioski płynące z ich analizy.

2. Badania

2.1. Podstawy teoretyczne

Sposób obliczania powierzchni kontaktu koła z nawierzchnią nie jest jednoznaczny. W literaturze można znaleźć różne wzory, na podstawie których możliwe jest wyznaczenie powyższej wielkości. Takie wzory przedstawili m.in. autorzy pozycji [9]. Powszechnym i najprostszym wzorem jest:

$$F = \frac{P}{p}, \quad (1)$$

gdzie:

F – powierzchnia styku koła z nawierzchnią [m²],

P – obciążenie pionowe koła na nawierzchnię [N],

p – ciśnienie w kole [Pa].

Jest to prosta formuła nieuwzględniająca wielu czynników. Niemniej jednak z dużą dokładnością pozwala na przybliżone określenie wielkości powierzchni styku koła z nawierzchnią i przy mało wymagających obliczeniach stanowi szybkie rozwiązanie. Kolejny wzór, przytaczany w literaturze przedstawia się następująco:

$$F = (0,75 + 0,005 \times D) \times \frac{P}{p}, \quad (2)$$

gdzie:

F – powierzchnia styku koła z nawierzchnią [m²],

P – obciążenie pionowe koła na nawierzchnię [N],

p – ciśnienie w kole [Pa],

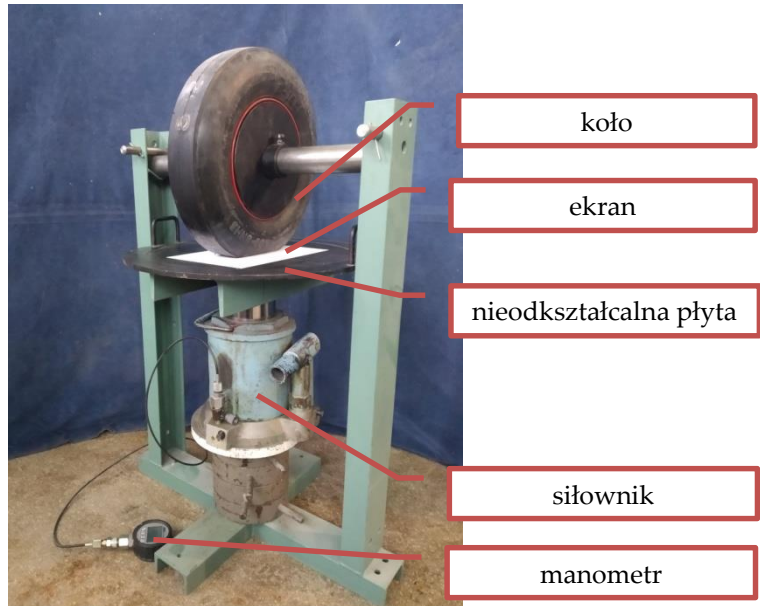
D – średnica koła [cm].

Wzór ten poza parametrami przytoczonymi w formule (1) uwzględnia także rozmiar koła w postaci jego średnicy. Wartość $(0,75 + 0,005 \times D)$ nosi nazwę współczynnika nośności opony i koryguje pole powierzchni o ok. 10–12% [9]. Daje to bliższy obraz faktycznej powierzchni styku. Przedstawione tu wzory nie uwzględniają w dalszym ciągu rodzaju opony (radialna czy diagonalna), sposobu bieżnikowania (gładka, gładko-bieżnikowana czy bieżnikowana), a także kształtu opony. Produkuje się opony o powierzchni styku kształtem zbliżonej do prostokąta oraz takie, których powierzchnia styku kształtuje się w formie elipsy. Ponadto, twardość gumy oraz temperatura pomiaru również mogą wpływać na końcową wielkość powierzchni styku.

2.2. Opis procedury

Pomiary wykonywano w warunkach laboratoryjnych, z zachowaniem warunków powtarzalności. Badanie polegało na wywarciu na koło o ustalonym ciśnieniu kontrolowanej siły poprzez nieodkształcalną płytę. Na oponę nanoszono kontrast w postaci mieszaniny wosków i lanoliny z czarnym barwnikiem, a pomiędzy kołem a płytą umieszczano ekran w formie arkusza papierowego w rozmiarze A3. Każdy arkusz oznaczony był sygnaturą opony, ciśnieniem w kole oraz siłą, z jaką wywierano nacisk. W trakcie wywierania nacisku płyty na koło, kontrast odbijał się na ekranie, tworząc ślad powierzchni styku w formie negatywu. W celu wykonania pomiaru zbudowano autorskie stanowisko badawcze. Do tego celu wykonano z grubościennych ceowników stalowych nieodkształcalną ramę (rys. 1).

W górnej części ramy zamontowano blokady umożliwiające zamocowanie koła pomiarowego. Koło pomiarowe przykręcano do specjalnie przygotowanych piast zamontowanych na stalowym pręcie o średnicy 50 mm. Na dole ramy umieszczono siłownik hydrauliczny z manometrem cyfrowym. Manometr został wcześniej skalibrowany w maszynie wytrzymałościowej, w wyniku czego otrzymano korelację wskazań manometru (w MPa) do wywieranej przez siłownik siły (w kN).



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego

Kolejne kroki procedury przedstawiają się następująco:

- 1) Umieszczenie koła na stanowisku pomiarowym.
- 2) Doprowadzenie ciśnienia w kole do zadanej wartości.
- 3) Naniesienie kontrastu na koło.
- 4) Umieszczenie czystego ekranu między kołem a płytą.
- 5) Wywarcie nacisku koła na płytę z zadaną siłą.

Kroki od 2 do 5 powtarzano dla różnych wartości ciśnienia w kole oraz wartości siły nacisku. Ekran z odbitym śladem powierzchni styku umieszczano w koszulkach foliowych, aby zminimalizować możliwość uszkodzenia.

Uzyskane w wyniku badania negatywy skanowano w rozdzielczości 600 dpi w formacie jpg. Następnie załączano wykonane skany w programie AutoCAD pod postacią podrysu. Podrys skalowano do rzeczywistych wymiarów, w wyniku czego jednostka długości skanowanego śladu koła odpowiadała jednostce długości rysunku. W programie tworzono obrys zeskanowanego śladu styku i z wykorzystaniem funkcji dostępnych w programie obliczano jego powierzchnię. Obrys tworzony był kilkakrotnie, a ostateczny wynik stanowił

średnią z poszczególnych pomiarów powierzchni. W ten sposób pomniejszono wpływ błędu związanego z prawidłowym utworzeniem obrysu zeskanowanego śladu styku.

2.3. Wyniki

Pomiary wykonano dla dwóch różnych typów opon: T520 oraz ASTM E-1551. Ciśnienie w oponie ustalano na podstawie parametrów opony oraz wartości ciśnienia eksploatacyjnego opony. Opony badano z ciśnieniem w kole pomiarowym w przedziale od 210 kPa do 700 kPa, z krokiem 70 kPa. Wartości siły nacisku koła na płytę ustalono na podstawie obciążenia eksploatacyjnego poszczególnych typów kół. Wartości te mieściły się w przedziale od 0,8 kN do 4 kN.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskano 83 ślady powierzchni styku koła z nawierzchnią. Niektóre kombinacje ciśnienia oraz siły nacisku nie mogły zostać poddane badaniu z uwagi na bezpieczeństwo obsługi. Przykład zeskanowanego negatywu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Negatyw powierzchni styku koło–nawierzchnia dla opony T520

Każdy z zeskanowanych negatywów śladu styku opony z nawierzchnią obrysowano w programie AutoCAD obwiednią. Następnie z utworzonej w ten sposób figury geometrycznej otrzymano pole powierzchni. Obwiednie tworzone kilkakrotnie dla tego samego koła i warunków pomiaru, a wyniki uśredniano. Wyniki przedstawiono w tab. 1 i 2 oraz częściowo na rys. 3 i 4 w formie wykresów powierzchni styku kół z nawierzchnią w zależności od siły nacisku. Każdy z wykresów odpowiada konkretnej, wybranej wartości ciśnienia w kole. Ponadto, na każdym wykresie przedstawiono wartości teoretyczne powierzchni styku wynikające ze wzorów (1) i (2). Na wykresach oznaczono odpowiednio jako equation (1) oraz equation (2).

Tabela 1

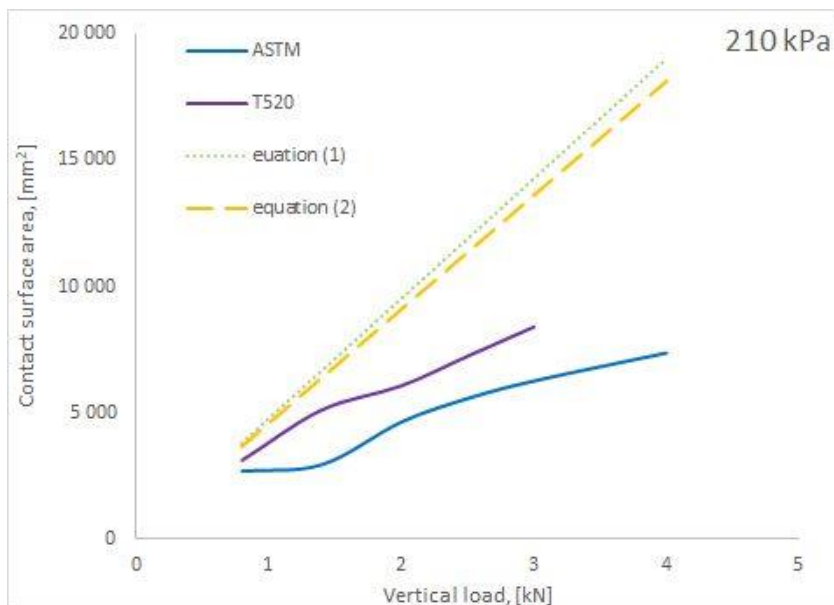
Wartości pola powierzchni otrzymanego w wyniku badania opony urządzenia ASFT – opona gładka ASTM (wyniki podane w mm²)

Ciśnienie \ Nacisk		0,8	1,4	2	2,5	3	4
		kN					
kPa	210	2 685	2 938	4 628	5 561	6 256	7 371
	280	2 069	3 391	4 084	4 957	5 674	-
	350	2 293	3 178	3 975	4 555	5 058	-
	420	2 129	3 201	3 762	4 420	4 957	-
	490	2 366	2 816	3 636	4 306	4 763	-
	560	2 157	2 974	3 606	3 923	4 671	-
	630	2 287	3 262	3 509	3 949	4 413	-
	700	2 276	2 918	3 304	3 930	4 393	5 037

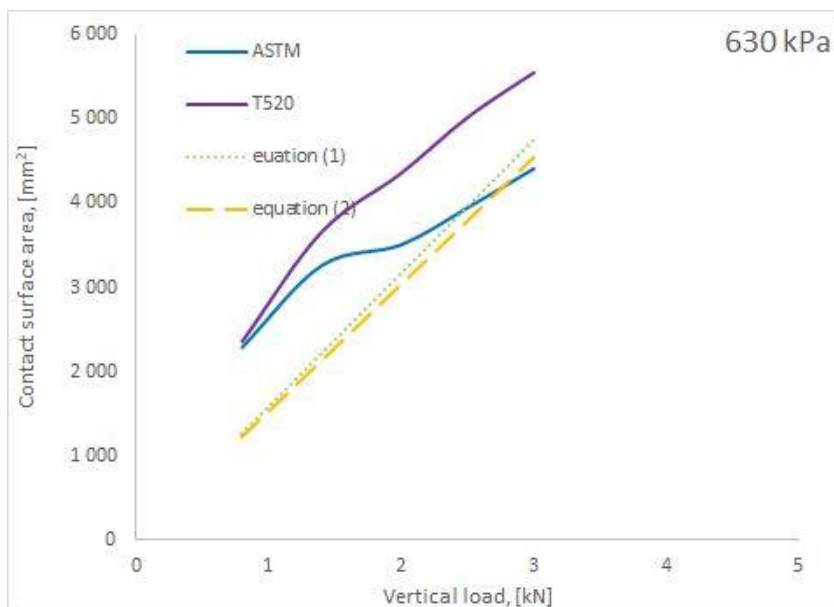
Tabela 2

Wartości pola powierzchni otrzymanego w wyniku badania opony urządzenia ASFT – opona bieżnikowana T520 (wyniki podane w mm²)

Ciśnienie \ Nacisk		0,8	1,4	2	2,5	3	4
		kN					
kPa	210	3 117	5 108	6 064	7 241	8 398	-
	280	3 091	4 845	5 582	6 466	7 291	-
	350	3 043	4 510	5 491	5 890	6 727	-
	420	3 029	4 275	5 045	5 599	6 184	-
	490	2 686	4 169	4 923	5 264	6 130	-
	560	2 552	4 026	4 750	5 189	5 728	-
	630	2 359	3 661	4 360	5 023	5 555	-
	700	2 066	3 259	4 354	4 816	5 383	6 315



Rys. 3. Powierzchnia styku opon testera tarcia z nawierzchnią w zależności od obciążenia dla ciśnienia w kole o wartości 210 kPa



Rys. 4. Powierzchnia styku opon testera tarcia z nawierzchnią w zależności od obciążenia dla ciśnienia w kole o wartości 630 kPa

3. Wnioski

Badania powierzchni styku opony z nawierzchnią prowadzone są od wielu lat w różnym kontekście. Naukowcy analizowali wpływ ciśnienia w oponie na kształtowanie się naprężeń w nawierzchni, badano powierzchnię styku opony samochodowej w zależności od obciążenia. Powierzchni styku przyglądano się również w aspekcie właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni. Tak zróżnicowane podejście do przedstawionego w artykule zjawiska pokazuje, jak istotny jest kontakt opony statku powietrznego z nawierzchnią lotniskową, po której się porusza.

Autorzy niniejszej pracy zaprezentowali wyniki badania zależności między polem powierzchni styku wybranych opon pomiarowych testerów tarcia a siłą nacisku koła na nawierzchnię oraz wartością ciśnienia w kole. W badaniu uwzględniono dwie najczęściej stosowane na świecie opony pochodzące od testerów tarcia nawierzchni lotniskowych – oponę gładko bieżnikowaną T520 oraz gładką ASTM E-1551.

Analizując przedstawione powyżej wyniki, należy zauważyć, że w żadnym przypadku uzyskane w trakcie badania wyniki pola powierzchni styku koło–nawierzchnia nie pokrywały się z wartościami teoretycznymi uzyskanymi według wzorów (1) oraz (2). W każdym przypadku pole powierzchni styku koła z nawierzchnią zwiększało wartość wraz ze wzrostem siły nacisku. Odwrotnie proporcjonalnie prezentowała się zależność pola powierzchni od ciśnienia w kole. Wraz ze wzrostem ciśnienia w kole pole powierzchni zmniejszało wartość.

Zależność między obciążeniem pionowym oraz ciśnieniem w kole a powierzchnią kontaktu nie jest jednoznaczna. Obie testowane opony posiadają te same wymiary i według wzoru (2) powinny prezentować dla tych samych warunków pomiaru te same wartości pola powierzchni kontaktu. W rzeczywistości opona T520 generuje mniejszą powierzchnię styku niż opona ASTM. Ponadto, przy wartości ciśnienia w kole na poziomie 350–420 kPa wartości uzyskane w badaniu zbliżają się do wartości teoretycznych utworzonych według wzorów (1) i (2). Przy niższym ciśnieniu uzyskiwana powierzchnia styku jest mniejsza niż teoretyczna, natomiast przy wyższym ciśnieniu powierzchnia styku przewyższa wartości teoretyczne.

Otrzymane wyniki badań na zaprojektowanym stanowisku pomiarowym sugerują, że na powierzchnię styku opony z nawierzchnią mają wpływ inne czynniki niż tylko obciążenie pionowe oraz ciśnienie w kole. Pozwala to wysnuć teorię, iż poza obciążeniem pionowym, ciśnieniem w kole oraz średnicą opony istnieją inne czynniki determinujące rzeczywistą wielkość pola powierzchni styku koła statku powietrznego z nawierzchnią.

4. Literatura

1. De Beer M.: Measurement of tyre/pavement interface stresses under moving wheel loads. CSIR Roads and Transport Technology: Pretoria, South Africa, 1994.
2. De Beer M., Maina J.W., van Rensburg Y., Greben J.M.: Toward using tire-road contact stresses in pavement design and analysis. *Tire Science and Technology*, 40(4), 2012.
3. Elfasakhany A.: Tire pressure checking framework: A review study. *Reliability Engineering and Resilience*, 1(1), 2019.
4. Hernandez J.A., Al-Qadi I., De Beer M.: Impact of tire loading and tire pressure on measured 3D contact stresses. *Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements*, ASCE 2013.
5. Leiva-Villacorta F., Vargas-Nordbeck A., Aguiar-Moya J.P.: Loria-Salazar. Influence of tire footprint area and pressure distribution on pavement responses. [W:] J.P. Aguiar-Moya (red.): *The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability*; Springer International Publishing: Switzerland, 2016.
6. Maegawa S., Itoigawa F., Nakamura T.: Effect of normal load on friction coefficient for sliding contact between rough rubber surface and rigid smooth plane. *Tribology International*, No. 92, 2015.
7. Maina J., De Beer M.: Improved performance evaluation of road pavements by using measured tyre loading. Science real and relevant: 2nd CSIR Biennial Conference, CSIR International Convention Centre Pretoria, 2008.
8. Nita P.: *Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych*. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2008.
9. Perdomo D., Nokes B.: Theoretical analysis of the effects of wide-base tires on flexible pavements using CIRCLY. *Rigid and Flexible Pavement Design and Rehabilitation (Pavement Design, Management and Performance)*, 1388, 1993.
10. Rosu I., Elias-Birembaux H.L., Lebon F., Lind H., Wangenheim M.: Experimental and numerical simulation of the dynamic frictional contact between an aircraft tire rubber and a rough surface. *Lubricants*, 4(29), 2016.
11. Sebaaly P., Tabatabaee N.: Effect of tire pressure and type on response of flexible pavement. *Transportation Research Board*, 1227, 1989.
12. Toma M., Andreescu C., Stan C.: Influence of tire inflation pressure on the results of diagnosing brakes and suspension. *Procedia Manufacturing*, No. 22, 2018.
13. Yang W., Tiecheng S., Yongjie L., Chundi S.: Prediction for tire-pavement contact stress under steady-state conditions based on 3D finite element method. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 9(4), 2016.
14. Yun D., Hu L., Tang C.: Tire-Road contact area on asphalt concrete pavement and its relationship with the skid resistance. *Materials*, 13(615), 2020.

