

Projekt i wykonanie w technologii przyrostowej kół łożaka marsjańskiego z wypełnieniem strukturalnym

Project of Mars rover wheels based on structural infill using additive manufacturing

ANDRZEJ ZAKRĘCKI
BARTŁOMIEJ GACZOREK
ADRIANNA KANIA
KATARZYNA BERENT*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.3.40>

Opisano proces projektowania i wytwarzania w kole naukowym AGH Space Systems bezdętkowych kół do łożaka marsjańskiego, który startuje w konkursie University Rover Challenge. Niektóre z podzespołów łożaka są na tyle unikalne, że trzeba je wykonać od podstaw. Zaproponowano własny algorytm generowania wypełnienia. Przeprowadzono badania wytrzymałościowe (wytrzymałości na rozciąganie, zginanie i ściskanie) w celu wstępnej identyfikacji parametrów materiałowych. Ich wyniki wykorzystano w analizie wytrzymałościowej MES. Koła wykonano z dwóch polimerów w technologii przyrostowej *fused filament fabrication* (FFF) i zamontowano je w łożaku KALMAN.

SŁOWA KLUCZOWE: łożak marsjański, druk 3D, FFF, zawody URC, badania materiałowe

Described is the process of designing and manufacturing tubeless wheels for the Mars rover with structural infill by the AGH Space Systems scientific club, who will take part in the University Rover Challenge competition. Some of Mars rover subsystems' are so unique hence they should be manufactured from the beginning. The algorithm for generating the structural infill has been proposed. The strength tests were conducted for the preliminary identification of material parameters, and their results were used in FEM strength analysis. Wheels have been made of polymers with fused filament fabrication (FFF) additive technology, and then applied in the KALMAN rover.

KEYWORDS: Mars rover, 3D printing, FFF, URC competition, material tests

Ze względu na znaczne różnice w warunkach atmosferycznych na Ziemi i Marsie oraz wysokie koszty lotów załogowych do tej pory nie zdecydowano się przeprowadzić misji z udziałem astronautów. Aby pozyskać dane na temat warunków panujących na Czerwonej Planecie i położyć podwaliny pod przyszłe misje załogowe, naukowcy i inżynierowie zdecydowali się wykorzystać autonomiczne pojazdy, które bez wsparcia człowieka mogą wykonać zaplanowane zadania [1].

Łażak marsjański jest rodzajem sondy kosmicznej. To autonomiczny pojazd, który podczas eksploracji obcych planet jest w stanie zebrać próbki geologiczne z trudno dostępnym miejsc [2].

Od kilku lat przeprowadza się studenckie konkursy, takie jak University Rover Challenge (URC) oraz European Rover Challenge (ERC), których celem jest opracowanie konstrukcji łożaków marsjańskich i ich testowanie w symu-

lowanych warunkach, zbliżonych do tych, jakie panują na Marsie. Budowanie takich pojazdów pozwala studentom na zdobycie wiedzy z zakresu projektowania urządzeń wysyłanych w przestrzeń kosmiczną. Koło naukowe AGH Space Systems przygotowuje łożaka marsjańskiego o nazwie KALMAN.

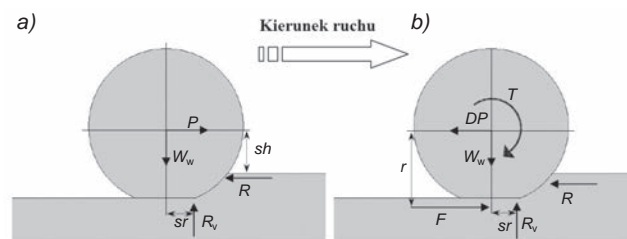
Ze względu na budowę łożaka oraz warunki jego pracy istotnym elementem konstrukcyjnym pojazdu są koła wraz z zespołem napędowym. Zewnętrzna powierzchnia koła wchodzi w kontakt z podłożem. Dlatego powinno ono przede wszystkim zapewniać odpowiednią sztywność i wytrzymałość pod obciążeniem, przyczepność do podłoża oraz być odporne na odkształcenia. Uwzględniono również pustynne warunki, w jakich odbywają się zawody URC i ERC.

Inspiracją do zaprojektowania i zbudowania kół była stosowana w pojazdach terenowych i quadach opona bezdętkowa o strukturze plastra miodu, dostosowująca się kształtem do warunków eksploatacji pojazdu [3–5].

Warunki pracy koła łożaka

Podczas jazdy na koło łożaka działają trzy siły (rys. 1):

- siła tarcia pochodząca od podłoża, zależna od ciężaru pojazdu i rodzaju powierzchni, z którą styka się koło;
- siła napędowa pochodząca z silnika elektrycznego, przenoszona na koło jezdne;
- siła nacisku koła na podłoże.



Rys. 1. Siły działające na koło: a) koło stojące w miejscu, b) koło napędzane [4]; R – siła tarcia, T – moment obrotowy pochodzący z silnika, W_w – nacisk, R_v – siła reakcji podłoża, P – siła napędowa koła, DP – siła oporu toczenia, sh – głębokość zanurzenia koła w podłożu, sr – szerokość koła oddziałująca z podłożem

Na podstawie analizy pracy koła łożaka marsjańskiego wyróżniono następujące przypadki wytrzymałościowe:

- felga koła jest poddana obciążeniu na zginanie, rozciąganie oraz ściskanie,
- opona koła jest poddana siłom powodującym ściskanie.

Cel projektu

W poprzednim projekcie łożaka marsjańskiego – PHOBOS, realizowanym przez AGH Space Systems – wykorzystano gotowe koła pochodzące z modelu samochodu RC.

* Inż. Andrzej Zakręcki (andrzejzakrecki@onet.pl) – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, AGH Space Systems; Bartłomiej Gaczorek (abart.g@gmail.com) – Crystal Cave; mgr inż. Adrianna Kania (kania.adrianna@gmail.com), dr inż. Katarzyna Berent (kberent@agh.edu.pl) – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii

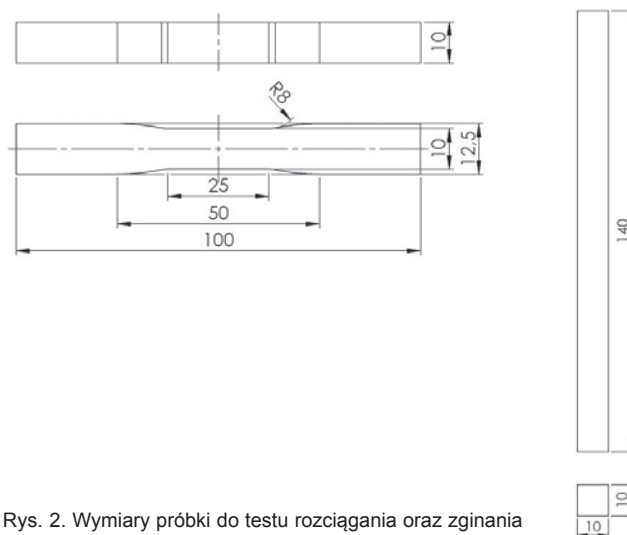
Takie rozwiązanie nie było optymalne ze względu na mechanizm przeniesienia napędu, duże odkształcenia kół pod wpływem przyłożonego obciążenia oraz małą powierzchnię styku z podłożem, przez co pojazd znajdował się w równowadze chwiejnej.

Po analizie dostępnych rozwiązań kół dla pojazdów o masie własnej do 50 kg zdecydowano się opracować własną koncepcję koła, tak aby spełnić następujące kryteria:

- zwiększyć sztywność i wytrzymałość kół pod wpływem przyłożonego obciążenia oraz przyczepność do podłoża,
- zminimalizować masę własną (całkowita masa pojazdu nie może przekroczyć 50 kg),
- umożliwić dostosowanie napędu do konstrukcji felgi i prędkości maksymalnej 3 km/h, z jaką może się poruszać pojazd podczas zawodów.

Wykorzystano elastyczne tworzywa sztuczne (tj. elastomery), które spełniają kryteria wytrzymałościowe dla założonych obciążeń i warunków pracy. Opony i felgi wytworzono z użyciem technologii przyrostowych opartych na metodzie *fused filament fabrication* (FFF) [6].

Na pierwszym etapie dobrano odpowiednie materiały konstrukcyjne. Opona bezpośrednio styka się z podłożem, dlatego wybrano materiał Fiberflex 40D firmy Fiberlogy, wykonany na bazie TPE (termoplastycznego elastomeru) [7]. Charakteryzuje się on wysoką odpornością na ścieranie, pękanie oraz obciążenia dynamiczne. Jego właściwości materiałowe pozwalają na zastosowanie produkowanej opony jako zamiennika seryjnie wytwarzanych kół, np. do modeli samochodów RC, dzięki możliwości modyfikacji jej sztywności w zależności od wypełnienia podczas wydruku 3D. Felgę wykonano z filamentu CarbonFil firmy FormFutura. Jest to kopomiler PETG (politereftalan etylenu modyfikowany glikolem) wzmocniony



Rys. 2. Wymiary próbki do testu rozciągania oraz zginania



Rys. 3. Materiał PETG wzmocniony włóknem węglowym: a) próba rozciągania z ekstensometrem, b) próba zginania, c) próba ściskania

włóknami węglowymi, oferujący połączenie sprężystości z wytrzymałością [8]. Na kolejnym etapie przeprowadzono analizy wytrzymałościowe materiałów w celu wyznaczenia parametrów pracy koła.

Badania wytrzymałościowe

Badania wytrzymałościowe miały na celu wyznaczenie wartości naprężeń i odkształceń, granic sprężystości oraz modułu Younga w zależności od zastosowanego wypełnienia, orientacji modelu w komorze roboczej i kierunku wydruku.

Z uwzględnieniem warunków pracy felgi zaprojektowano i wykonano próbki do badań wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie oraz zginanie, odnosząc się do badania ich własności jako kompozytów włóknistych. Próbki do badań odporności na rozciąganie miały formę kształtek wioselkowych, zgodnie z normą PN-EN ISO 527-2:2012, a próbki do badań odporności na zginanie były prostopadłościanami o wymiarach: $10 \times 10 \times 140$ mm (rys. 2). Próbki do próby ściskania przygotowano w formie kostki $10 \times 10 \times 10$ mm z materiału CarbonFil oraz w postaci walca o średnicy $\varnothing 30$ mm i wysokości 30 mm z materiału Fiberflex 40D. Kształtki z materiału CarbonFil wydrukowano z wypełnieniem 50% i 100% o strukturze plastra miodu, a z materiału Fiberflex 40D – z wypełnieniem 25%, 50% i 100%, o takiej samej strukturze jak materiał na felgę. Zastosowanie różnego wypełnienia miało na celu wybranie najlepszego wydruku, o optymalnych własnościach wytrzymałościowych.

Aby próbki były powtarzalne, ustalono zestaw stałych parametrów druku dla obu materiałów. Parametry druku obejmowały: prędkość druku, temperaturę podłoża, temperaturę ekstrudera, rodzaj dyszy oraz szybkość chłodzenia. Gotowe próbki poddano badaniom wytrzymałościowym (statycznym i dynamicznym) z użyciem maszyny wytrzymałościowej INSTRON 8872 (rys. 3).

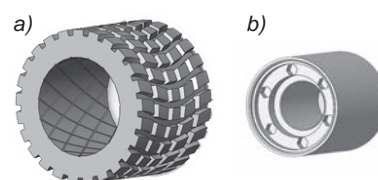
W wyniku badań zaobserwowano wzrost wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości wraz z procentem wypełnienia. Próby rozciągania w przypadku obydwu rodzajów wypełnień wykazały, że w przedziale $0 \div 45$ MPa element pracuje w zakresie sprężystym przy odkształceniu do 10% długości początkowej. Z krzywej zależności naprężenia od odkształcenia wyznaczono moduł Younga dla próbek o wypełnieniu 50% i 100%. Przy wypełnieniu 50% otrzymano moduł Younga równy 2750 MPa, a dla 100% – moduł Younga równy 3150 MPa. Opracowane wyniki z prób wytrzymałościowych posłużyły jako dane wejściowe do analizy metodą elementów skończonych, pozwalającej określić wytrzymałość zaprojektowanego koła.

Analiza wytrzymałości metodą elementów skończonych (MES)

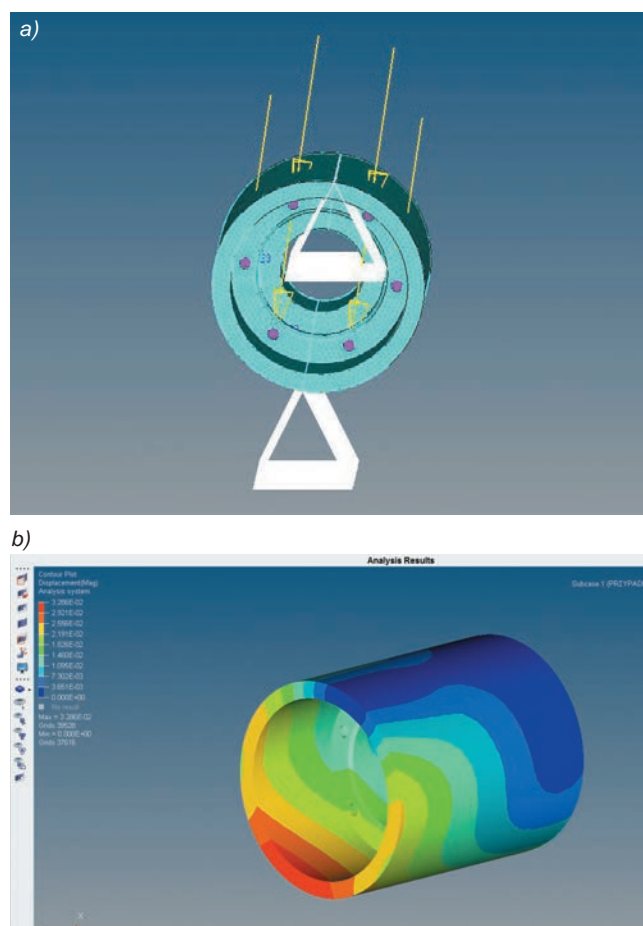
Podstawową bryłę modelu CAD wykonano w programie SolidWorks. Wymiary geometryczne opony oraz felgi ustalono na podstawie wielkości pola roboczego drukarki 3D oraz maksymalnej dopuszczalnej prędkości pojazdu, zgodnej z regulaminem konkursu [9]. Inspiracją do zaprojektowania bieżnika opony łazika były opony stosowane w pojazdach terenowych, takich jak quady. Na rys. 4 przedstawiono model opony i felgi.

Przeprowadzono numeryczne obliczenia wytrzymałościowe felgi łazika w programie Hypermesh, w oparciu o dane uzyskane z próbek. Jako warunki brzegowe odebrano stopnie swobody (elementy RBE2) odpowiadające za rotację i przemieszczenia koła wzdłuż osi X

Rys. 4. Modele CAD: a) opony, b) felgi



i Z, aby koło mogło wykonywać obrót wokół własnej osi. W punktach w kolorze fioletowym (elementy RBE3), zaznaczonych na rys. 5, przyłożono siłę o wartości 100 N w każdym otworze, która została przeniesiona z piasty na felgę.



Rys. 5. Nadanie warunków brzegowych (a), analiza danych otrzymanych z symulacji (b)

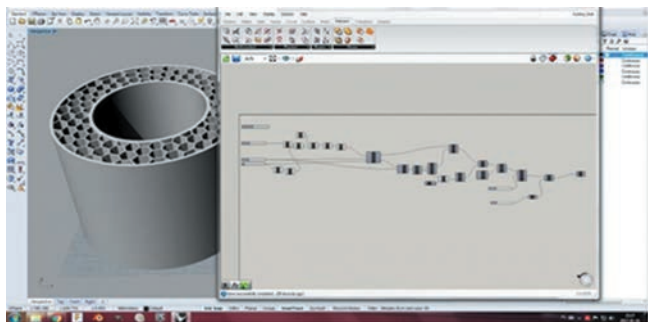
Przeprowadzono analizy numeryczne MES na podstawie danych wejściowych pochodzących z próbek o różnej wartości wypełnienia. Przyjęto kryterium optymalizacji oparte na minimalizacji masy felgi z zachowaniem dopuszczalnych naprężeń i odkształceń oraz z uwzględnieniem współczynnika bezpieczeństwa. Zdecydowano się na wykorzystanie danych z próby rozciągania dla próbki o wypełnieniu 50%. Po analizie wyników (rys. 5b) określono, że maksymalne odkształcenie średnicy felgi wynosi 1,4 mm (8% wartości początkowej), przy maksymalnym naprężeniu ok. 8 MPa. Jest to dopuszczalne odkształcenie dla materiału felgi. Na podstawie danych z prób eksperymentalnych stwierdzono, że dane z symulacji mieściły się w zakresie sprężystym materiału CarbonFil.

Badania doświadczalne próbek oraz analiza MES felgi zastosowanej w łaziku marsjańskim pozwoliły na określenie stanu naprężeń obciążonego komponentu. W oparciu o analizy wybrano optymalne wypełnienie modelu geometrycznego felgi – 50%.

Opracowanie algorytmu do wypełnienia strukturalnego opony

Opracowano algorytm strukturalnego wypełnienia opony. W technologiach przyrostowych istotny jest kierunek nakładania materiału budulcowego oraz wypełnienie wnętrza modelu (technologia FFF), które wpływają na wytrzymałość elementu [10, 11]. Zdecydowano się na modyfikację wypełnienia opony. Zmniejszenie procentu wypełnienia wpłynęło w głównej mierze na jej sztywność, sposób dopasowania do powierzchni podłoża i możliwość odkształcenia w zależności od pokonywanych przeszkód.

Założono wykonanie koła z dwóch części – oddzielnie opony i felgi, wydrukowanych z innych komponentów. W przypadku bezdętkowej opony zdecydowano się wykorzystać wydruk o strukturze plastra miodu, pozwalający na uzyskanie lepszych właściwości wytrzymałościowych poprzez modyfikację sztywności. Wirtualny model z wygenerowanym wypełnieniem strukturalnym przedstawiono na rys. 6. Dzięki takiej budowie obiekty osiągają dużą wytrzymałość z zachowaniem niskiej masy [8].

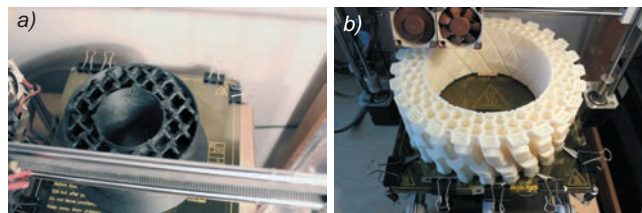


Rys. 6. Algorytm umożliwiający generowanie wypełnienia opon, opracowany na potrzeby projektu łazika KALMAN

Podczas projektowania algorytmu wykorzystano techniki algorytmiczne, aby zminimalizować masę opony, a jednocześnie zmienić sztywność w różnych obszarach, na podstawie prób ściskania próbek z materiału Fiberflex 40D [12]. Sztywność opony rośnie wraz z malejącą średnicą opony, ponieważ obszar stykający się z podłożem ma mniejszą gęstość wypełnienia od obszaru znajdującego się przy feldzie.

Wytworzenie kół łazika marsjańskiego

Po zakończeniu etapu generowania wypełnienia strukturalnego dla opony i felgi łazika oraz doborze parametrów druku 3D przystąpiono do wytworzenia elementów. W strukturze opony przewidziano rowki, aby wykonać połączenie klejone pomiędzy oponą a felgą (rys. 7). Komplet czterech opon i felg drukował się przez ok. 120 h. Następnie sklejono je ze sobą. W rezultacie masa pojedynczego koła wyniosła 1,06 kg (rys. 8).



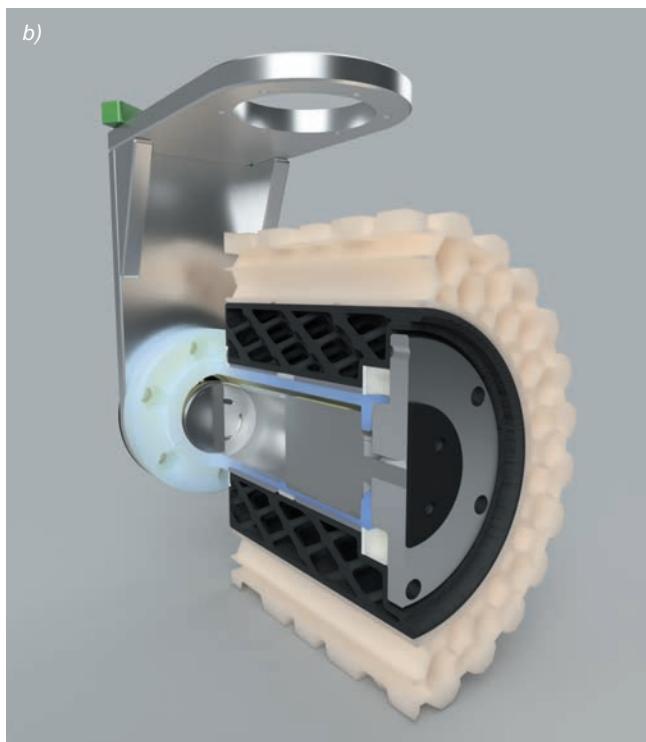
Rys. 7. Proces drukowania 3D: a) felgi, b) opony – z widocznymi rowkami na klej



Rys. 8. Gotowe koła łazika KALMAN

Podsumowanie

Dzięki współpracy z firmą Crystal Cave w kole naukowym AGH Space Systems udało się zrealizować projekt kół łazika marsjańskiego KALMAN z wykorzystaniem nowoczesnych technologii przyrostowych (rys. 9). Pojazd wyposażony w takie koła będzie gotowy do udziału w zawodach łazików marsjańskich URC 2018.



Rys. 9. Łazik KALMAN (a), wizualizacja modułu napędowego pojazdu (b)

Skonstruowane koła z oponami z wypełnieniem o strukturze plastra miodu po testach będą mogły być dostosowane do toru, po jakim porusza się łazik. Konstrukcja felgi pozwala na aplikację bezpośredniego układu przeniesienia napędu z silnika na koło. Koła bezdętkowe powinny działać tak samo podczas całego cyklu życia, bez potrzeby ich pompowania (jak w przypadku opon dętkowych).

Wykorzystanie druku 3D do produkcji kół łazika pozwoliło na skrócenie czasu wytwarzania wyrobu do pięciu dni roboczych. Dodatkową zaletą tej metody jest brak konieczności wytwarzania oprzyrządowania technologicznego, niezbędnego np. do wykonania tych samych elementów metodą wtrysku bądź frezowania/toczenia.

Metodą FFF można od razu otrzymać kształt strukturalnego plastra miodu. Modyfikując różne parametry, np. zagęszczenie wypełnienia wybranego obszaru, otrzymano gotowy element, niewymagający dodatkowego wykończenia poprzez obróbkę mechaniczną.

Takie rozwiązanie nadaje się także do zastosowania w robotyce mobilnej, gdy trzeba wykonać urządzenie do konkretnego celu i określonych warunków pracy. Jest to dobre rozwiązanie dla produkcji jednostkowej ze względu na niski koszt materiałów wsadowych oraz możliwość przeprowadzenia wielu iteracji w celu doboru najkorzystniejszego wariantu.

Podziękowania

Artykuł został opublikowany dzięki wsparciu firm DPS Software Sp. z o.o. (udostępnienie oprogramowania do modelowania 3D – SolidWorks) oraz DES ART Sp. z o.o. (udostępnienie oprogramowania do obliczeń numerycznych – pakiet HyperWorks).

Autorzy składają także podziękowania:

- firmie Crystal Cave Sp. z o.o., a zwłaszcza Bartłomiejowi Gaczorkowi – za wykonanie próbek do badań wytrzymałościowych, wydrukowanie opon i felg łazika oraz opracowanie algorytmu do strukturalnego wypełnienia kół (www.crystalcave.pl),
- dr. hab. inż. Andrzejowi Młyńcowi z Katedry Robotyki i Mechatroniki Akademii Górniczo-Hutniczej – za przeprowadzenie badań wytrzymałościowych i pomoc w interpretacji wyników,
- firmom Fiberlogy i Formfutura za dostarczenie filamentów.

LITERATURA

1. Kremer B., Kaźmierczak J. „*Perspektywy poszukiwań życia na Marsie*”. Warszawa: Kosmos, 2006, s. 365–380.
2. Szaśniadek J. „*Aerospace Robotics: Selected Papers from I Conference on Robotics in Aeronautics and Astronautics*”. Berlin: Springer, 2013.
3. Fazelpour M., Summers J.D. “Evolution of meso-structures for non-pneumatic tire development: a case study”. *Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*. 2B: 40th Design Automation Conference (2014): s. 1–11.
4. www.scientificamerican.com/article/tires-that-dont-need-air/ (dostęp: 05.02.2018).
5. Ju J., Summers J.D. “Hyperelastic constitutive modeling of hexagonal honeycombs subjected to in-plane shear loading”. *J. Eng. Mater. Technol.* 133 (2011): s. 11005–1+11005–8.
6. Budzik G., Siemiński P. „*Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D*”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2015.
7. Mutlu R., Alici G., Panhuis M., Spinks G. “Effect of flexure hinge type o a 3D printed fully compliant prosthetic finger”. *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Busan, 2015.
8. Szykiedans K., Credo W., Osiński D. “Selected Mechanical Properties of PETG 3-D Prints”. *Procedia Engineering*. 177 (2017): s. 455–461.
9. <http://urc.marssociety.org> (dostęp: 05.02.2018).
10. Wu J., Wang C.C.L., Zhang X., Westermann R. “Self-supporting rhombic infill structures for additive manufacturing”. *Computer-Aided Design*. 80 (2016): s. 32–42.
11. Siemiński P., Tomczuk M. „Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek wykonywanych wybranymi metodami szybkiego prototypowania”. *Mechanik*. 2 (2013): s. 1–20.
12. Barlas F. „*Design of a Mars Rover Suspension Mechanism*”. Izmir, Turkey: Izmir Institute of Technology, 2004. ■