

Adrian KRZEMIŃSKI
Mariusz KOSOBUDZKI*

DOI: https://doi.org/JoT2021_02

PROJEKT KOŁA WYKONANEGO W TECHNOLOGII PRZYROSTOWEJ DO POJAZDU WYSOKIEJ MOBILNOŚCI

Słowa kluczowe: *pojazd wysokiej mobilności, Scorpio, Rover Challenge, druk 3D, łożysko, URC, off-road*

Artykuł przedstawia opis prac koncepcyjnych, projektowych oraz nad opracowaniem parametrów wytwarzania koła do pojazdu wysokiej mobilności, wykonanego w technologii druku 3D. Opracowane koło było z przeznaczeniem do niekonwencjonalnego pojazdu off-road, nazywanego łożyskiem marsjańskim. Pojazd taki jest od wielu już lat opracowywany przez studenckie Koło Naukowe Pojazdów Niekonwencjonalnych Off-Road i z sukcesami bierze udział w zawodach międzynarodowych. Kolejna wersja pojazdu zakładała zwiększenie udziału nowych technologii wytwarzania podzespołów pojazdu, co powinno pozwolić na lepsze dopasowanie parametrów użytkowych pojazdu do rzeczywistych warunków panujących podczas zawodów. Punktem odniesienia były parametry koła dotychczas wykorzystywanego w pojeździe i wykonanego z Cordury.

1. WSTĘP

W pojazdach wysokiej mobilności jednym z kluczowych podzespołów, zapewniających możliwość jazdy, w tym jazdy terenowej jest koło. W pojazdach samochodowych off-road w skład koła wchodzi felga z oponą oraz elementy dodatkowe, np. specjalne wkładki pozwalające na jazdę pojazdu w sytuacji uszkodzenia opony i zaniku ciśnienia powietrza w jej wnętrzu. Chęć zwiększenia odporności koła na działanie czynników zewnętrznych prowadzących do utraty szczelności opony ukierunkowuje badania na poszukiwanie rozwiązań, które pozwoliłyby wyeliminować konieczność stosowania opon pneumatycznych i zastąpienie ich inną strukturą, która dawałaby podobne charakterystyki sztywności czy tłumienia. Przykładem takiego rozwiązania są koła, w których oponę pneumatyczną zastępuje materiał o strukturze plastra miodu, co zostało pokazane na rysunku 1. Przedstawione koło zostało zastosowane do pojazdu wysokiej mobilności HMMWV.

* Koło Naukowe Pojazdów Niekonwencjonalnych OFF-ROAD, Politechnika Wrocławska



Rys. 1. Pojazd HMMWV z kołami kompozytowymi [2]

Fig. 1. HMMWV vehicle with composite tires [2]

Poza pojazdami samochodowymi podobne konstrukcje kół, w których opona wykonana jest jako struktura materiału o wymaganych charakterystykach użytkowych, stosowane są w pojazdach należących do grupy łazików marsjańskich (Mars rover), które są opracowywane przez agencje kosmiczne największych państw świata (np. NASA), ale również przez koła naukowe studentów uczelni technicznych. Przykładem takiego pojazdu jest łazik Scorpio X rozwijany przez Koło Naukowe Off-Road, zrzeszające Studentów Politechniki Wrocławskiej. Skonstruowany pojazd przedstawiony jest na rysunku 2. Do tego pojazdu opracowano wstępną koncepcję opon wykonanych w technologii przyrostowej (druk 3D).



Rys. 2. Łazik Scorpio X

Fig. 2. Scorpio X rover

2. WSTĘPNE ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE DO OPON POJAZDU SCORPIO X

Na podstawie doświadczeń zebranych podczas udziału w zawodach University Rover Challenge (URC), Canadian International Rover Challenge (CIRC), czy European Rover Challenge (ERC) ustalono, że opony w tego typu pojazdach charakteryzują się parametrami, które zostały przedstawione i omówione w [1]. Bazując na przeprowadzonych analizach przyjęto wstępnie, że do kolejnej wersji łazika Scorpio X opony powinny charakteryzować się parametrami przedstawionymi w tabeli 1.

Tab. 1. Podstawowe założenia konstrukcyjne do nowej opony do pojazdu Scorpio X

Tab. 1. Basic design assumptions for a new tyre for Scorpio X rover

Parametr	Zakładana wartość
Szerokość opony	120 mm
Średnica opony	300 mm, razem z bieżnikiem
Podatność osiowa	Zmniejszona o ok. 10% w stosunku do dotychczasowych opon
Podatność promieniowa	Zminimalizowana
Współczynnik tłumienia	Utrzymany na dotychczasowym poziomie
Przyczepność	Zwiększenie przyczepności podczas jazdy na wprost i redukcja oporów występujących podczas skrętu

3. WSTĘPNA KONCEPCJA BIEŻNIKA OPONY

Ze względu na zakładane warunki ruchu pojazdu (podłoże odkształcalne i nieodkształcalne) przyjęto, że kształt bieżnika będzie typu choinkowego. Opony z takim kształtem bieżnika są popularne w maszynach polowych oraz pojazdach terenowych. Zdecydowano się jednak na wprowadzenie pewnych zmian w kształcie bieżnika, mających na celu redukcję oporów ruchu występujących przy skręcie poślizgowym pojazdu. Zmiana polegała na symetrycznym ułożeniu części występów bieżnika i połączeniu ich elementem ułożonym osiowo. Schematycznie koncepcję bieżnika przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Porównanie opon z bieżnikiem komercyjnym i zaproponowanym w ramach projektu [3]

Fig. 3. Comparison between comercial tire tread and one proposed in article [3]

Przewidywano, że powinno to zwiększyć możliwą do przeniesienia siłę obwodową koła na podłożu podatnym opisaną zależnością (1) [2]:

$$T_{\max} = \int_{A_S} \tau_g Da \quad (1)$$

gdzie:

- T_{\max} -maksymalna reakcja styczna w kole jezdnym,
- τ_g -naprężenia graniczne ścinające grunt,
- A_S -powierzchnia ścinania gruntu w obrębie styku z podłożem.

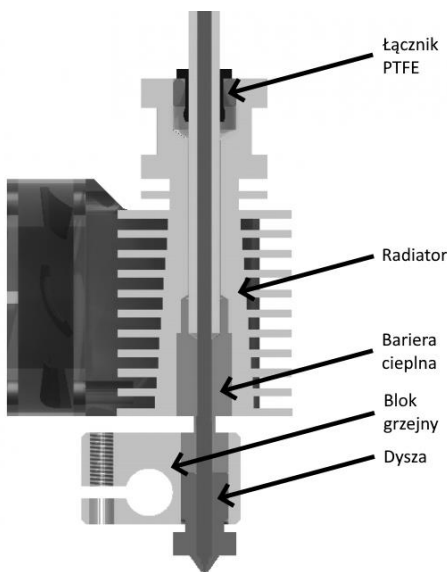
4. CHARAKTERYSTYKA TECHNOLOGII DRUKU 3D

Technologia druku 3D jest dynamicznie rozwijająca się technologia wytwarzania przyrostowego. W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój tej technologii I obecnie wyróżnia się kilka rodzajów druku 3D [4]. Do produkcji opony została wykorzystana najbardziej popularna I ogólnodostępna technologia FDM (Fused Deposition Modelling), znana również jako FFF (Fused Filament Fabrication). Metoda ta polega na kolejnym osadzaniu pojedynczych warstw materiałów termoplastycznych [5]. Do realizacji tego procesu używa się specjalnych maszyn, nazywanych drukarkami 3D, które są w stanie poruszać się w 3 osiach – x, y, z. Na poruszającym się wózku, zamontowana jest głowica drukująca z dyszą (nazywana

hotend'em), która nanosi kolejne warstwy materiału o ustalonej grubości I szerokości. Sam hotend (rysunek 4) składa się z kilku zasadniczych elementów:

- dysza,
- blok grzejny,
- bariera cieplna,
- radiator,
- łącznik PTFE.

Materiał jest podawany przez łącznik PTFE (politetrafluoroetylen – teflon), a następnie jest wtłaczany do bloku grzejnego. W trakcie procesu drukowania, blok grzejny może osiągać temperaturę nawet 300°C (w zależności od materiału drukowanego). Powoduje to stopienie materiału, który wypływa przez dyszę i osadza się na elemencie drukowanym. W wyniku ciągłego ruchu głowicy, osiąga się ciągłą linię przetopionego materiału. W celu zabezpieczenia innych elementów drukarki przed wysoką temperaturą, stosuje się izolator termiczny – element o małym przekroju w celu zminimalizowania transferu energii cieplnej. Do dodatkowej ochrony stosuje się ponadto radiator, który odprowadza ciepło, które przedostaje się przez barierę cieplną.



Rys. 4. Schemat hotendu typowej drukarki 3D [6]

Fig. 4. Hotend scheme of typical 3D printer [6]

Istotnym elementem drukarki 3D jest również ekstruder. Jest to układ, który podaje materiał do hotendu. Zazwyczaj ruch podawania materiału realizowany jest przez zastosowanie silnika krokowego z śrubą radełkowaną. Można wyróżnić 2 zasadnicze typy ekstruderów – direct (bezpośredni) oraz bowden. Ekstruder typu direct zamontowany jest bardzo blisko hotendu i ułatwia drukowanie materiałów

elastycznych (z powodu braku ryzyka wyboczenia filamentu przy ekstruderze). Ekstruder typu Bowden jest zamontowany na ramie drukarki 3D. Odległość ekstrudera i hotendu wymaga zastosowania przewodnicy dla filamentu, - zazwyczaj jest nią elastyczna rurka PTFE.

Materiał, który wykorzystuje się w druku 3D nazywany jest filamentem. Jest to cienka żyłka (zazwyczaj o średnicy 1,75 mm), która jest w sposób ciągły podawana do głowicy, która nagrzewa i topi filament. Płynny filament wypływa z dyszy drukującej i tworzy kolejne warstwy wyrobu. W ten sposób można uzyskiwać kształty jakie nie byłyby możliwe przy zastosowaniu klasycznych metod ubytkowych. W przypadku drukowania elementów, które nie posiadają powierzchni bezpośrednio stykającej się z polem roboczym drukarki, możliwe jest drukowanie podpór (ang. support), które można usunąć po zakończeniu procesu drukowania.

Do kluczowych parametrów, jakie wpływają na druk 3D w technologii FDM możemy zaliczyć szerokość i wysokość warstwy, stopień i rodzaj wypełnienia i prędkość druku [7]. Dodatkowo możliwe jest modyfikowanie innych wartości, na przykład temperatury dyszy podczas druku, jednak zależy ona głównie od rodzaju materiału drukowanego.

5. OGRANICZENIA TECHNOLOGII DRUKU 3D

Technologia druku 3D, pomimo dużej uniwersalności, posiada kilka istotnych ograniczeń w zastosowaniu. Pierwszym ograniczeniem jest uzyskanie wyrobu, który charakteryzuje się anizotropowością wytrzymałości poszczególnych warstw, co jest następstwem ich niepełnego przetopienia. Dotyczy to zwłaszcza wytrzymałości na rozciąganie, która może wynosić max. do 80% wytrzymałości materiału filamentu, w zależności od przyjętych parametrów druku [7].

Kolejnym problemem jest warstwowość druku. Powoduje ona powstawanie charakterystycznej chropowatej powierzchni wytwarzanego elementu. Może to być niepożądane w zastosowaniach, które wymagają otrzymania powierzchni gładkiej. W przypadku niektórych materiałów, możliwa jest dalsza obróbka drukowanego elementu, np. ścierna lub chemiczna (stosowanie acetonu).

Duży problem pojawia się wtedy, kiedy drukowany jest element, który nie ma powierzchni przylegającej bezpośrednio do powierzchni roboczej stołu drukarki. W tej sytuacji stosuje się materiał podporowy, który następnie trzeba usunąć. Jest to strata materiału, która zwiększa materiałochłonność procesu. Dodatkowo materiał podporowy nie daje gwarancji poprawnego druku, co może skutkować utraceniem całej części (rysunek 5).



Rys. 5. Uszkodzony druk z powodu zbyt dużej odległości elementów podporowych (suport) [8]

Fig. 5. Damage of 3D printed element due to distances between supported elements [8]

6. DOBÓR MATERIAŁU NA FELGĘ I OPONĘ KOŁA

Wstępny dobór materiału do wytworzenia elementów koła został podzielony na dwa etapy.

Pierwszy etap polegał na określeniu materiału do wykonania opony. Wiedząc, że opona powinna charakteryzować się odpowiednią podatnością, przyjęto, że do jej produkcji potrzebny będzie filament o odpowiedniej elastyczności i podatności. Wybór ograniczono do materiałów, których charakterystyka podatności była podobna do gumy. Wymaganie takie spełniły filamenty z rodziny TPU (termoplastyczne poliuretany). Charakteryzują się one dużą sprężystością, a także odpornością na ścieranie. Ta druga cecha jest ważna ze względu na ruch pojazdu po podłożu zarówno betonowym, jak i piaszczysto-żwirowym. TPU charakteryzuje się także dobrą pamięcią kształtu, tzn. element wstępnie odkształcony wraca do pierwotnego kształtu po ustaniu siły odkształcającej. Równie ważną cechą TPU jest odporność na działanie warunków atmosferycznych, a także substancji chemicznych jak: oleje, tłuszcze i rozpuszczalniki. Poniżej zestawiono najbardziej popularne materiały z rodziny TPU:

- NinjaFlex – producent NinjaTek,
- FiberFlex – producent Fiberlogy,
- S-Flex – producent Spectrum Filaments,
- TPU – producent Devil Design.

Uwzględniając dostępne dane materiałowe i mechaniczne wymienionych materiałów, ich cenę oraz łatwość ich użycia w druku wybrano ostatecznie FiberFlex 40D od firmy Fiberlogy. Właściwości tego filamentu przedstawiono na rysunku 6.

Właściwości mechaniczne	Metoda testowa	Jednostka	Wartość typowa
Twardość	D2240	Shore D	40
Gęstość	-	g/cm ³	1,16
Absorpcja wody	D570	%	0,6
Skurcz	D955	%	0,8
Napężenie przy 10% obciążeniu	D638	kg/cm ²	44
Napężenie przy zerwaniu	D638	kg/cm ²	270
Wydłużenie przy zerwaniu	D638	%	680
Moduł sprężystości przy zginaniu	D790	kg/cm ²	680
Wytrzymałość na rozrywanie	D1004	kN*/m	115
Udarność według Izoda z karbem	D256	kg*cm/cm	N.B.
Sprężystość	D2632	%	57
Punkt topnienia	D3418	°C	157
Temperatura ugięcia pod obciążeniem (HDT)	D648	°C	70
Odporność na ścieranie	D1044 (kółko H-18)	mg	95

Rys. 6. Dane materiałowe filamentu FiberFlex 40D [9]

Fig. 6. Material data sheet of FiberFlex 40D filament [9]

Przy wyborze materiału do produkcji felgi kierowano się przede wszystkim sztywnością materiału oraz dostępnością filamentów. Analizowano następujące materiały:

- PLA – Poliaktyl,
- PET-G – Politereftalan etylenu stabilizowany glikolem,
- ABS - Terpolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy,
- ASA – Terpolimer akrylonitrylo-styrenowo-akrylanowy,
- PA12 – Nylon.

Najbardziej popularnym materiałem o wystarczająco dużej wytrzymałości jest PLA. Jest to polimer biodegradowalny, znany również pod nazwą kwasu polimlekowego. Jest on produkowany z trzciny cukrowej oraz kukurydzy. Kolejnym analizowanym filamentem był PET-G, który jest mniej wytrzymały od PLA, ale posiada zdecydowanie większą udarność oraz odporność chemiczną. Materiał ABS oraz o podobnych właściwościach ASA, są materiałami wytrzymałymi, stosowanymi szeroko w przemyśle. Niestety, przy ich wykorzystaniu pojawia się potrzeba stosowania komory grzewczej z powodu dużego skurczu oraz wydzielania toksycznych oparów. Ostatnim analizowanym filamentem był PA12, znany także jako nylon. Posiada on wystarczająco dużą odporność na zmiany temperatury z zakresu od -20 do 50 °C, alkohole oraz rozpuszczalniki. Jest wytrzymały oraz wysoko elastyczny. Zestawienie wybranych właściwości mechanicznych materiałów przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Zestawienie wybranych właściwości mechanicznych materiałów [10]

Tab. 2. List of material's selected mechanical properties [10]

	PLA	PET-G	ABS	ASA	PA12
Temperatura zeszklenia (°C)	57	77	107	81	172
Gęstość ($\frac{g}{cm^3}$)	1,29	1,29	1,19	1,17	1,02
Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	48	40	30	24	33
Wydłużenie przy zerwaniu (%)	4,3	6,4	11	2,7	23,6
Naprężenie przy zginaniu (MPa)	59	55	46	45	38
Moduł sprężystości przy zginaniu (GPa)	1,47	1,39	1,08	1,36	0,78
Udarność wg Izoda z karbem (kJ/m ²)	3,14	3,27	8,93	3,81	12,81

Przy ostatecznym wyborze filamentu kierowano się wymaganymi temperaturami druku, wymaganiem komory grzewczej, parametrami mechanicznymi oraz ceną. Z listy materiałów odrzucono ASA oraz ABS, ponieważ dostępne drukarki nie posiadały komór grzewczych. Najlepszymi parametrami mechanicznymi cechował się Nylon co zdecydowało o zastosowaniu tego materiału. Wybierając z pośród różnych producentów, zdecydowano się na filament firmy Fiberlogy (rysunek 7).

Właściwości mechaniczne	Metoda testowa	Jednostka	Wartość typowa
Moduł sprężystości przy rozciąganiu	ISO 527	MPa	1400
Naprężenie zrywające	ISO 527	MPa	51
Moduł sprężystości przy zginaniu	ISO 178	MPa	1200
Gęstość	ISO 483	g/cm ³	1,02
Właściwości reologiczne	Metoda testowa	Jednostka	Wartość typowa
Współczynnik płynięcia (MVI) (235°C / 5 kg)	ISO 11357	cm ³ /10 min	180
Właściwości termiczne	Metoda testowa	Jednostka	Wartość typowa
Punkt topnienia	ISO 1133	°C	180

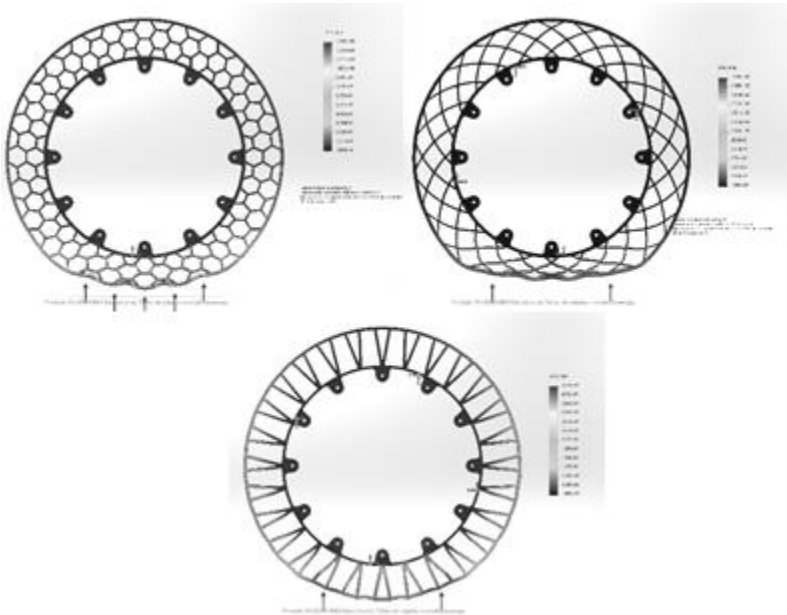
Rys. 7. Dane mechaniczne dla materiału Nylon PA12 [11]

Fig. 7. Mechanical data sheet of Nylon PA12 [11]

7. MODELOWANIE KOŁA

Modelowanie koła zostało rozpoczęte od opracowania modelu opony. Do stworzenia wszystkich modeli zostało wykorzystane oprogramowanie Solidworks 2019. Ze względu na przyjęte założenie, że opony mają być nie pneumatyczne, modelowanie należało rozpocząć od opracowania koncepcji wypełnienia strukturalnego opony. Wstępnie rozważano dwa typy takich struktur, tj. wypełnienie w formie plastra miodu (sześciokątne) oraz szprychowe. Przygotowano modele opon przedstawione na rysunku 6, które następnie analizowano ze względu na rozkłady odkształceń z wykorzystaniem oprogramowania Solidworks Simulation.

W celu uzyskania miarodajnych wyników, modele zostały dopasowane pod względem masy. Wiązało się to z dopasowaniem grubości ścianek struktur. Następnie każde koło zostało poddane takim samym obciążeniom oraz tak samo utwierdzone. Siatka została dobrana w taki sposób, żeby każda ścianka posiadała grubość co najmniej 2 elementów skończonych. Wyniki analiz odkształceń przedstawiono na rysunku 8.



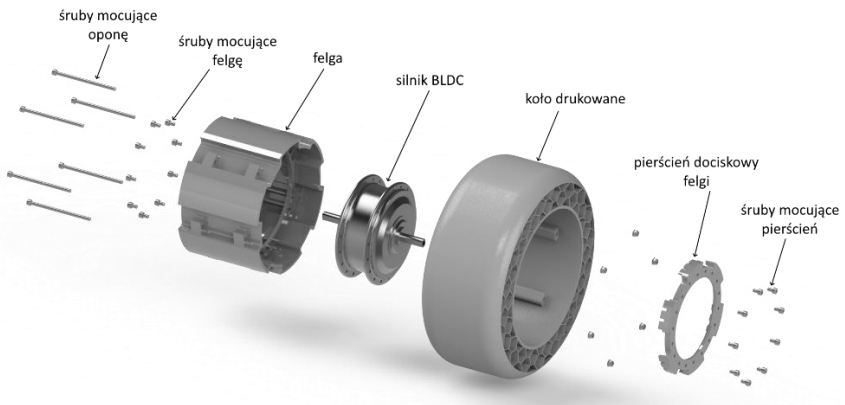
Rys. 8. Rozkład odkształceń do obciążenia pionowego wynoszącego 150 N

Fig. 8. Displacement distribution to a vertical load of 150 N

Analizując otrzymane wyniki ustalono, że najlepszym wypełnieniem była struktura sześciokątna ze względu na równomiernie rozłożone odkształcenie pomiędzy wieloma komórkami struktury.

7.1. PIERWSZA WERSJA KOŁA

Opracowano model opony z parametryczną szerokością ścianki sześciokąta. Wstępnie założono jej grubość wynoszącą 2 mm (ostateczna grubość zależała od otrzymanej sztywności promieniowej opony oraz możliwości wykonania druku 3D). Równoległe opracowano model felgi koła mocowanej bezpośrednio z silnikiem napędowym, stanowiącym piastę koła. Założono dodatkowo, że całe koło powinno dać się szybko demontować do części składowych w warunkach poligonowych. Umożliwiłoby to szybką wymianę opon podczas zawodów oraz pozwoliłoby na dopasowanie modelu opony do ustalonych warunków ruchu pojazdu np. do jazdy po asfalcie, betonie itd. Widok zaprojektowanego modelu koła przedstawiono na rysunku 11. Porównując masę dotychczasowej felgi z modelem wersji drukowanej osiągnięto redukcję masy z 772 g do 667 g.



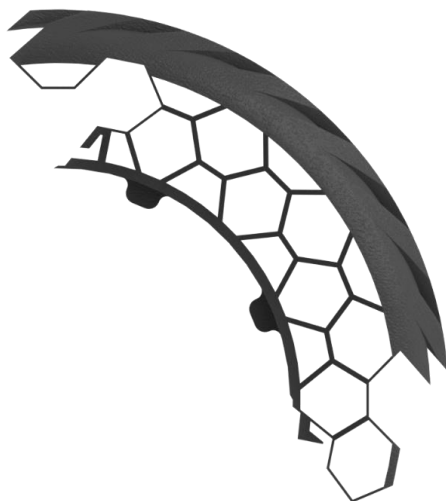
Rys. 9. Render koła z drukowaną oponą i felgą (wersja 1)
Fig. 9. Render of a wheel with a printed tire and rim (version 1)

Przeprowadzone analizy MES koła wykazały, że ugięcie opony po wprowadzeniu zmian w strukturze sześciokątów wynosiło około 7 mm. Była to wartość ugięcia za mała w stosunku do założeń. Jednocześnie, redukcja grubości ścianek poniżej 2 mm mogła prowadzić do niepoprawnego wydruku elementu. Spowodowało to konieczność przemodelowania struktury wypełnienia opony. Ponadto, ze względów organizacyjnych zdecydowano się przemodelować oponę tak, żeby jej wydruk był możliwy na drukarce 3D o standardowym polu roboczym 200 x 200 mm.

7.2. DRUGA WERSJA KOŁA

Uwzględniając wcześniejsze wnioski wprowadzono istotne zmiany do modelu koła. Zmniejszono felgę redukując jej średnicę z 190 mm do 172 mm. Doprowadziło to do redukcji masy felgi z 667 g do 492 g. Przyjęcie ograniczenia wyma-

ganej wielkości pola roboczego drukarki 3D skutkowało koniecznością podzielenia jednej opony na 3 równe części przedstawione na rysunku 12. Realizacja koncepcji podziału opony na 3 elementy, korzystna ze względu na łatwość wydrukowania wprowadzała jednak dodatkowe wymagania co do prawidłowego łączenia elementów ze sobą.



Rys. 10. Jeden segment opony

Fig. 10. One segment of tire

Podczas oceny otrzymanych elementów zauważono, że sposób ich łączenia w obszarze bieżnika nie jest prawidłowy. Analiza sposobu łączenia elementów wykazała, że powierzchnia bieżnika ma tendencję do odchylania się od powierzchni czoła bieżnika. Stwierdzono potrzebę przemodelowania sposobu łączenia elementów opony. Zdecydowano się zmienić przebieg linii podziału elementów opony w ten sposób, aby sześciokąty brały udział w połączeniu kształtowym elementów opony.

7.3. TRZECIA WERSJA KOŁA

Przy opracowywaniu kolejnego modelu koła uwzględniono uwagi, jakie powstały przy analizie poprzednich koncepcji. Przemodelowano sposób łączenia elementów opony poprzez dodanie połączenia kształtowego w obszarze bieżnika opony. Ze względu na wprowadzony podział opony na elementy zmieniono liczbę punktów mocujących oponę do felgi z 8 na 6. Do nowej koncepcji opony dodano wstępnie opracowany wzór bieżnika. Przyjęto wysokość bieżnika na 5 mm oraz szerokość w części środkowej na 10 mm. (Rysunek 11). W celu zabezpieczenia

struktury hexagonalnej opony przed niepożądanym gromadzeniem zanieczyszczeń zdecydowano się na zadrukowanie zewnętrznych ścian bocznych opony.



Rys. 11. Render koła z dodanym bieżnikiem
Fig. 11. Render of the wheel with added tread

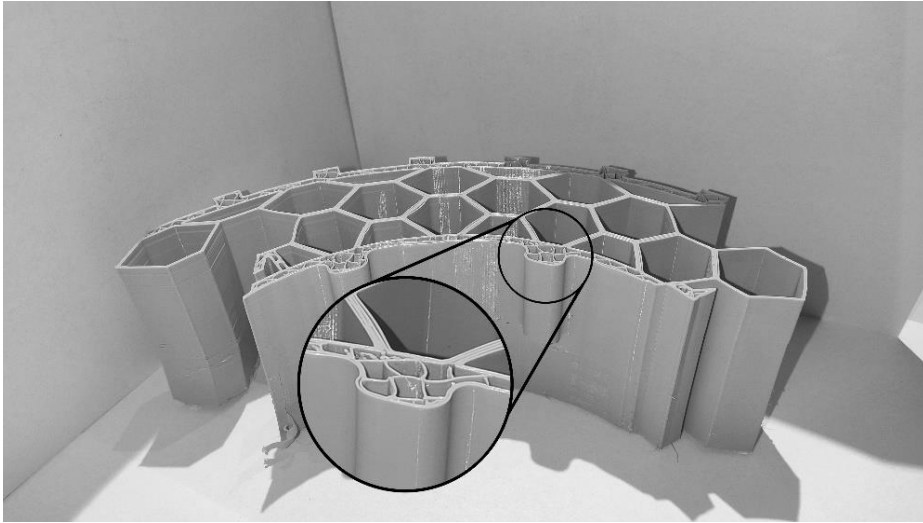
8. WYDRUK ELEMENTÓW KOŁA I FELGI

Po wprowadzeniu niezbędnych poprawek w modelach elementów koła zdecydowano się na próbny ich wydruk. Do stworzenia plików .gcode użyto oprogramowania Cura 4.8.0. Przyjęte parametry druku były następujące:

- temperatura dyszy: 210 °C,
- temperatura stołu: 60 °C,
- szerokość warstwy: 0,4 mm,
- wysokość warstwy: 0,2 mm,
- prędkość drukowania: 30 mm/s,
- wyłączona retrakcja filamentu,
- wypełnienie: 20%,
- typ wypełnienia: Cubic (sześciokątne),
- podpory: włączone.

Czas wydruku jednego elementu koła wynosił ponad 30 godzin. Filament Fiber-Flex 40D okazał się być dosyć trudnym materiałem do drukowania tak dużych elementów – pojawiał się problem z zapewnieniem ciągłości podawania filamentu

do ekstrudera, co skutkowało nieprawidłowym wydrukiem elementu. Przykład niewłaściwie wydrukowanego podzespołu przedstawiono na rysunku 12.



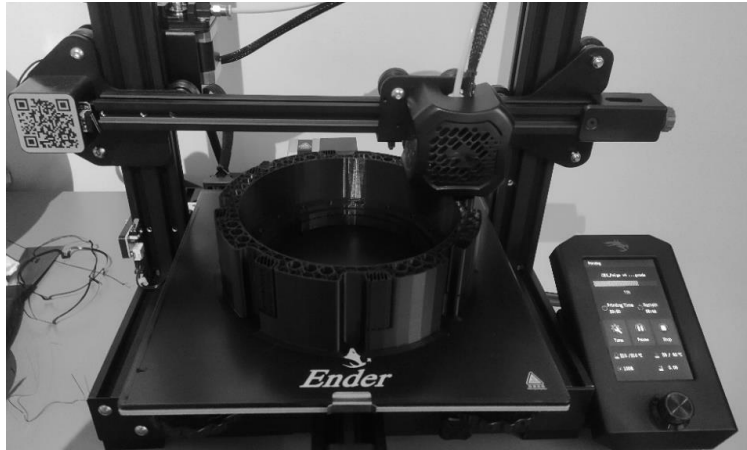
Rys. 12. Nieudany wydruk elementu koła

Rys. 12. Failed print of tire segment

Drukowanie elementów felgi z filamentów sztywnych okazało się być zadaniem łatwiejszym do wykonania. Zdecydowano się na drukowanie całej felgi ustalając następujące parametry wydruku:

- temperatura dyszy: 260 °C,
- temperatura stołu: 100 °C,
- szerokość warstwy: 0,4 mm,
- wysokość warstwy: 0,28 mm,
- prędkość drukowania: 45 mm/s,
- retrakcja: 5 mm,
- wypełnienie: 20%,
- typ wypełnienia: Cubic (sześciokątne),
- podpory: włączone.

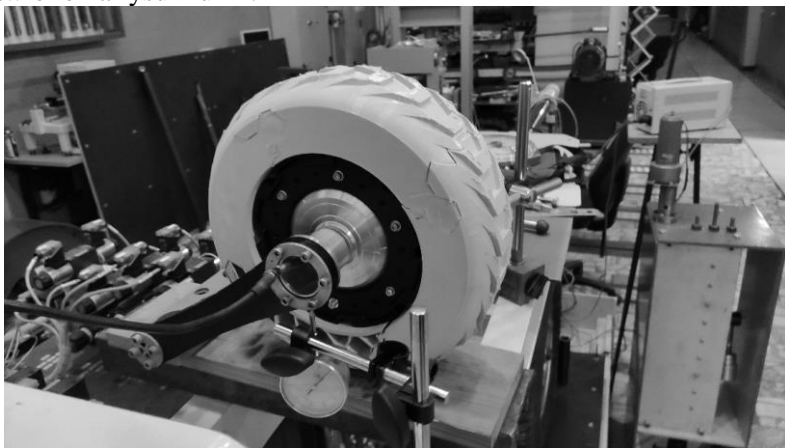
Częściowo wydrukowana felga została przedstawiona na rysunku 13.



Rys. 13. Zdjęcie zrobione podczas procesu drukowania felgi
Fig. 13. Photo of wheel rim during printing

9. WSTĘPNE TESTY STANOWISKOWE WYDRUKOWANEGO KOŁA

Po wydrukowaniu wszystkich elementów koła i połączeniu ich z silnikiem wykonano szereg testów stanowiskowych prototypu koła. W badaniach wyznaczono m.in. strzałkę ugięcia koła. Wykorzystano do tego celu zegarowe czujniki przemieszczeń, które zamontowano promieniowo względem osi koła. Podczas badania koło było obciążane odważnikami obciążającymi oś koła. Stanowisko do badań przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 14 Koło na stanowisku do pomiaru ugięcia opony
Fig. 14. Stand – test of wheel – measurement of tire deflection

Przeprowadzono 5 serii pomiarów ugięcia opony. Każda kolejna próba przeprowadzana była w innym położeniu kątowym koła. Wyniki badania przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Wyniki pomiarów ugięcia opony drukowanej
Tab. 3. Results of measurements of printed tire deflection

	Próba 1		Próba 2		Próba 3	
Obciążenie	Czujnik lewy [mm]	Czujnik prawy [mm]	Czujnik lewy [mm]	Czujnik prawy [mm]	Czujnik lewy [mm]	Czujnik prawy [mm]
6 kg	1,52	2,32	1,97	2,72	1,82	2,9
10 kg	2,38	3,94	2,41	4,61	3,8	4,47
14 kg	4,85	5,13	4,62	5,48	4,13	6,01
18 kg	5,47	6,74	5,15	7,47	5,57	7,67
20 kg	6,51	7,84	6,12	8,58	6,54	8,66
	Próba 4		Próba 5			
Obciążenie	Czujnik lewy [mm]	Czujnik prawy [mm]	Czujnik lewy [mm]	Czujnik prawy [mm]		
6 kg	2,03	2,86	1,93	2,82		
10 kg	3,82	4,7	3,8	4,44		
14 kg	4,94	6,86	4,82	5,98		
18 kg	5,41	7,94	5,39	7,43		
20 kg	6,42	8,91	6,35	8,34		

Niesymetryczność w ugięciu opony, widoczna we wszystkich pomiarach (wskazanie czujnika lewego i prawego) wynika z niezachowania poziomego położenia podstawy koła (koło było przechylone w prawą stronę, czego nie zauważono podczas pomiarów). Podobny test sztywności promieniowej opon wykonano dla dotychczasowych kół pojazdu, w których opona była wykonana z Cordury (tabela 4).

Tab. 4. Wyniki pomiarów ugięcia opony z Cordury
 Tab. 4. Results of measurements of Cordura tire deflection

	Próba 1		Próba 2		Próba 3	
Obciążenie	Czujnik lewy [mm]	Czujnik prawy [mm]	Czujnik lewy [mm]	Czujnik prawy [mm]	Czujnik lewy [mm]	Czujnik prawy [mm]
6 kg	6,69	6,46	5,86	6,02	6,56	6,45
10 kg	9,16	9,02	9,21	9,12	8,89	9,32
	Próba 4		Próba 5			
Obciążenie	Czujnik lewy [mm]	Czujnik prawy [mm]	Czujnik lewy [mm]	Czujnik prawy [mm]		
6 kg	5,7	6,21	6,54	6,72		
10 kg	9,25	9,33	9,1	8,93		

Ugięcie dla obciążenia większego niż 10 kg nie było możliwe, ze względu na przekroczenie zakresu czujnika zegarowego.

Kolejnym badaniem jakie przeprowadzono był pomiar siły wymaganej do wprowadzenia koła w poślizg. Do przeprowadzenia badania wykorzystano koło drukowane oraz z Cordury. Do każdego z kół przytwierdzono stałe obciążenie, wynoszące 12 kg. Pomiar siły zrealizowano za pomocą siłomierza, który przytwierdzono do osi koła. Wykonano 5 pomiarów dla powierzchni stalowej oraz drewnianej. Wyniki badania przedstawiono w tabeli 5.

Tab. 5. Pomiary siły wymaganej do przesunięcia wzdłużnego koła, któremu odebrano możliwość obrotu

Tab. 5. Measurements of the force required to move a locked wheel

	Wymagana siła dla koła z Cordury™ [N]					Wymagana siła dla koła drukowanego [N]				
Drewno	8	7,5	8,5	8	8,5	7	7,5	7,5	7,5	7
Stal	10,5	10	10	10	10,5	12,5	11,5	12	12	12,5

10. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

W przedstawionych pracach celem było zaprojektowanie i wytworzenie koła w technologii druku 3D do pojazdu off-road. Przeprowadzone prace w zakresie modelowania oraz wytwarzania komponentów kół do pojazdów wykazały, że technika druku 3D może być uznana za perspektywiczną. W toku prac nad nową koncepcją koła napotkano i skutecznie rozwiązano szereg problemów związanych m.in. z optymalnym doбором materiałów do wytworzenia opony oraz samym ustaleniem parametrów druku. Zastosowany filament Fiberlogy FiberFlex 40D

pozwoił uzyskać wymagane charakterystyki koła, w tym wymaganą przyczepność do uwzględnianych podłoży oraz dużą sztywność osiową w porównaniu z dotychczas wykorzystywanymi kołami.

Dużym wyzwaniem okazało się uzyskanie powtarzalnej jakości wydruku elementów opony. Prowadzi to do wniosku, że druk 3D jest wymagającą metodą wytwarzania w zastosowaniu do produkcji wielkoseryjnej. Bez wątplenia jednak dobrze sprawdza się podczas realizacji prac badawczych, takich jak projekt opony i felgi do łazika marsjańskiego. Wyprodukowanie opon o podobnym kształcie byłoby bardzo kosztowne, czy wręcz niemożliwe dla innych metod wytwarzania.

Wstępne badania otrzymanego koła do pojazdu Scorpio wykazały, że koło drukowane cechuje się m.in. mniejszą podatnością promieniową niż koło z Cordury. Było to zgodne z założeniami początkowymi. Interesujący wynik przyniosło wyznaczenie wartości siły obwodowej, jaka jest potrzebna do wprawienia koła drukowanego w poślizg. Wykazano, że na powierzchni drewnianej siła ta jest mniejsza niż na powierzchni metalowej (gładkiej) w porównaniu do kół wykonanych z Cordury. Planowane są dodatkowe testy poligonowe, które mają potwierdzić, czy osiągnięte parametry użytkowe nowego koła są korzystne do ruchu całego pojazdu

Wykonany prototyp koła nie ma postaci ostatecznej i pozostawia miejsce na przeprowadzenie modyfikacji struktury wypełniającej oponę oraz dodatkowych badań całego zespołu. Przedstawione prace zostały ograniczone do jednego tylko wypełnienia strukturalnego. Można jednak przewidywać, że istnieje bardziej optymalna struktura, która przeniesie obciążenia w bardziej korzystny sposób, co będzie przedmiotem dalszych prac. Wymiernym efektem opisanych prac było wytworzenie funkcjonalnych kół do pojazdu oraz zgromadzenie doświadczeń, które zostaną wykorzystane przy konstruowaniu i wytwarzaniu kół do kolejnej wersji pojazdu Scorpio X, nad którym rozpoczęto już prace w Kole Naukowym Studentów OFF-ROAD.

LITERATURA

- [1] KRZEMIŃSKI A., KOSOBUDZKI M., *Wstępna analiza wymagań stawianych kołom jeźdnym do pojazdu wysokiej mobilności*, Journal of Translogistics 2020, Tom Vol. 6 (16)
- [2] <https://wordlesstech.com/humvee-airless-tire-test/> (dostęp: 06.04.2021 r.)
- [3] <https://www.dormaragro.pl/> (dostęp: 5.04.2021 r.)
- [4] FIAŁ C., PIEKNIK M., *Druk 3D jako technologia przyszłości – część 1.*, Technologia i Jakość Wytrobów, Tom R. 65, 2020, 92-105
- [5] MICHTA D., KACZMARSKA B., GIERULSKI W., SZMIDT A., *Uniwersalność druku 3D w technologii FDM.*, Politechnika Świętokrzyska, 2017
- [6] <http://technovade.pl/> (dostęp: 20.01.2021 r.)
- [7] LONCIERZ D., KAJZER W., *Wpływ parametrów druku 3D w technologii FDM na własności mechaniczne i użytkowe obiektów wykonanych z PLA*, Aktualne Problemy Biomechaniki., Tom z. 10, 2016, 43-48.
- [8] https://help.prusa3d.com/en/article/poor-bridging_1802 (dostęp: 25.01.2021 r.)
- [9] <https://fiberlogy.com/> (dostęp: 6.01.2021 r.)

[10] <https://zortrax.com/pl/> (dostęp: 6.01.2021 r.)

[11] <https://fiberlogy.com/> (dostęp: 6.01.2021 r.)

WHEEL DESIGN MADE IN ADJUSTABLE TECHNOLOGY FOR A HIGH MOBILITY VEHICLE

Key words: *high mobility vehicle, Scorpio, Rover Challenge, 3D printing, rover, URC, off-road*

The article presents conceptual work, design work, and the development of parameters for the production of wheels for a high-mobility vehicle made in 3D printing technology. The developed wheel was intended for an unconventional off-road vehicle, called the Mars rover. For many years, such vehicle was being developed by the student Scientific Association of Unconventional Off-Road Vehicles and it has participated successfully in international competitions. The next version of the vehicle assumed the use of a technology of manufacturing vehicle components which ensures adjustment of the vehicle's operational parameters to the conditions prevailing during the competition. The benchmark was the parameters of the wheels used in the vehicle and made of Cordura.

