

Aleksy CIURKO¹

Opiekun naukowy: Arkadiusz TRĄBKA²

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA ELEKTRYCZNEGO ROWERU GÓRSKIEGO Z SILNIKIEM MOCOWANYM DO RAMY

Streszczenie: Przedstawiono model obliczeniowy roweru górskiego ze wspomaganie elektrycznym. Analizy numeryczne przeprowadzono w programie ANSYS Workbench dla sześciu wariantów obciążenia stanowiących odwzorowanie sił przekazywanych na konstrukcję podczas przejazdu po trasie terenowej. Sprawdzono, jak zabudowa silnika oraz akumulatora w ramie roweru wpływa na wytrzymałość oraz sztywność wybranych elementów jego struktury nośnej.

Słowa kluczowe: analiza wytrzymałościowa, metoda elementów skończonych, obciążenia dynamiczne, rower górski ze wspomaganie elektrycznym

STRENGTH ANALYSIS OF AN ELECTRIC MOUNTAIN BIKE WITH A MOTOR ATTACHED TO THE FRAME

Summary: The computational model of a mountain bike with electric power assistance is presented. Numerical analyses were performed using the ANSYS Workbench software. Six load variants representing forces transferred to the structure while driving on the off-road route were considered. It was checked how the motor and battery placement in the bicycle frame affect the strength and rigidity of selected elements of its supporting structure.

Keywords: strength analysis, finite element method, dynamic loads, mountain bike with electric power assistance

1. Wprowadzenie

Od kilku lat można zaobserwować wzrost liczby rowerów, których napęd posiada wspomaganie elektryczne [1]. Wspomaganie elektryczne początkowo stosowane było w tzw. rowerach miejskich. Realizowano go poprzez umieszczenie silnika

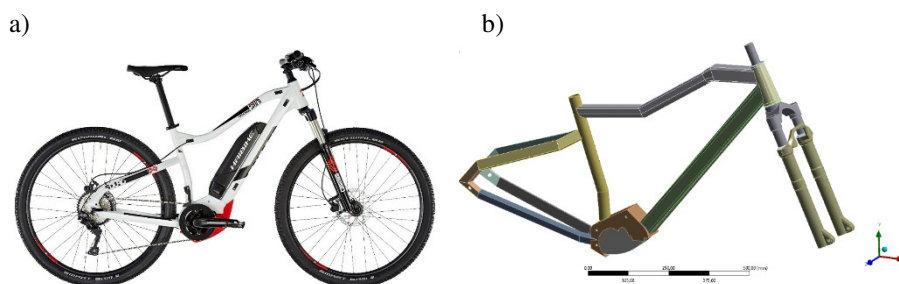
¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność: Komputerowe Wspomaganie Konstruowania i Wytwarzania, ciurkoa@gmail.com

² dr. inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, atrabka@ath.bielsko.pl

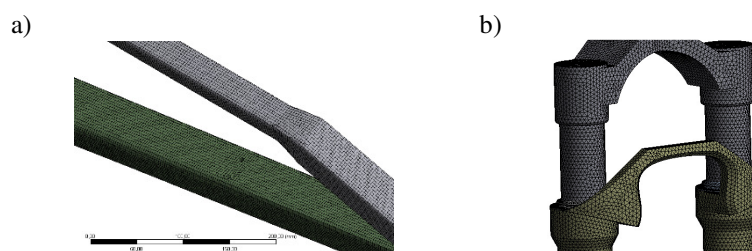
elektrycznego w piaście przedniego lub tylnego koła. Z uwagi na dużą popularność tzw. rowerów górskich, także w nich zaczęto instalować wspomaganie elektryczne [2]. Jednak, z uwagi na specyfikę warunków użytkowania tychże rowerów, okazało się, że konstrukcje z silnikami zabudowywanymi w piastach kół, ze względu na niekorzystny rozkład masy, nie sprawdzają się tak dobrze w warunkach terenowych jak podczas jazdy miejskiej. Z tego względu opracowano konstrukcję z silnikiem umieszczonym centralnie, tzn. w miejscu korby. Tego typu wspomaganie oznaczało konieczność zmodyfikowania konstrukcji struktury nośnej jaką jest rama roweru. W niniejszej pracy podjęto się zadania polegającego na sprawdzeniu, jak zabudowa silnika elektrycznego oraz ogniw zasilających w ramie roweru górskiego wpływa na wytrzymałość oraz sztywność wybranych elementów jego struktury nośnej.

2. Model obliczeniowy

Model obliczeniowy (rys. 1b) wykonano w programie metody elementów skończonych ANSYS na podstawie modelu geometrycznego narysowanego w programie CATIA V5. Za podstawę do opracowania modeli przyjęto konstrukcję roweru górskiego firmy HAIBIKE (model SDURO HARDNINE 2.0) z centralnie umieszczonym silnikiem elektrycznym i amortyzowanym widelcem przednim (rys. 1a).



Rysunek 1. Rower górski ze wspomaganem elektrycznym: a) obiekt rzeczywisty – rower SDURO HARDNINE 2.0 [3], b) model obliczeniowy



Rysunek 2. Podział na elementy skończone dla: a) fragmentu ramy, b) fragmentu widelca przedniego

Przystępując do opracowania modelu obliczeniowego zdecydowano, że rama oraz korpus silnika będą rozpatrywane jako struktury modelowane przy użyciu elementów

powłokowych (rys. 2a), natomiast widelec przedni i połączenie widełca tylnego z piastą koła zostaną opisane elementami bryłowymi (rys. 2b). Pozostałe elementy roweru, istotne z punktu widzenia przekazywanych na konstrukcję obciążeń (kierownica, siodło oraz korba z pedałami), wprowadzono do modelu obliczeniowego jako nieodkształcalne elementy belkowe (tabela 1). Aby uzyskać regularny podział geometrii na elementy skończone, zrezygnowano z zaokrągleń o małym promieniu, a także pominięto otwory na przewody.

3. Warunki brzegowe i dobór obciążeń

Podparcie modelu obliczeniowego zrealizowano przez wprowadzenie więzów:

- w miejscu osadzenia piasty tylnego koła - pozostawiono tylko możliwość obrotu wokół osi Z głównego układu współrzędnych;
- w miejscu osadzenia piasty przedniego koła - pozostawiono tylko możliwość przesuwu wzdłuż osi X oraz możliwość obrotu wokół osi Z głównego układu współrzędnych.

Obciążenia konstrukcji roweru górskiego oraz kierunki i zwroty odpowiadających tym obciążeniom wektorów sił, przyjęto na podstawie informacji zawartych w pracach [4–9].

W grupie obciążeń statycznych uwzględniono: obciążenie od ciężaru rowerzysty o wartości 800 N, obciążenie od ciężaru silnika o wartości 35 N oraz obciążenie od ciężaru baterii o wartości 30 N [10].

W grupie obciążeń dynamicznych uwzględniono obciążenia stanowiące odzwierciedlenie sił przekazywanych na konstrukcję podczas normalnej jazdy, tzn. pedałowania w pozycji siedzącej oraz pięciu spośród najczęściej zachodzących zdarzeń o krótkotrwałym bądź nagłym charakterze, jakie mogą wystąpić w trakcie jazdy rowerem górskim. Miejsca przyłożenia sił do modelu obliczeniowego oraz kierunki działania wektorów, dla których przeprowadzono analizy dynamiczne, zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Warianty obciążeń dynamicznych roweru górskiego (cz. 1)

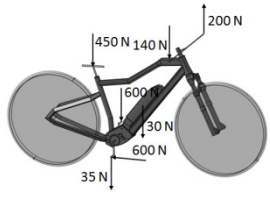
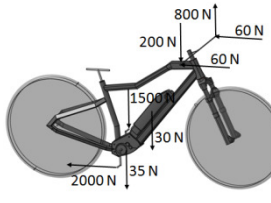
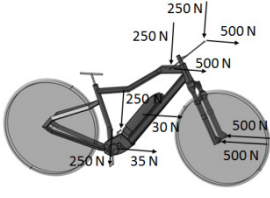
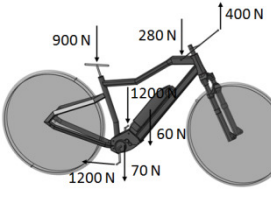
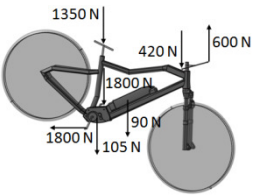
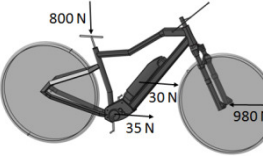
Wariant/opis	Schemat	Wariant/opis	Schemat
1 pedałowanie w pozycji siedzącej		2 pedałowanie w pozycji stojącej	
3 gwałtowne hamowanie na przednie koło		4 zeskok na oba koła	

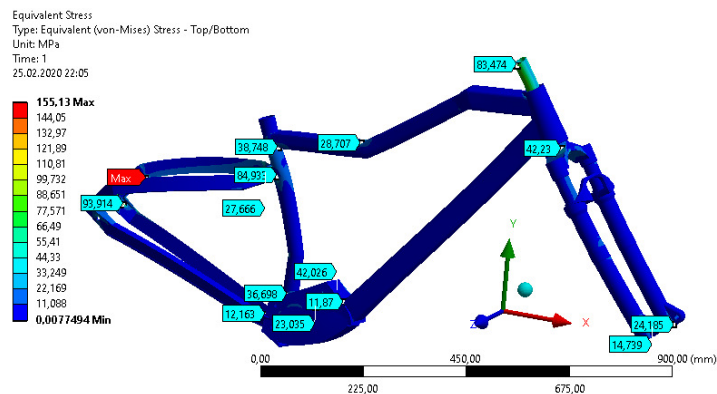
Tabela 1. Warianty obciążeń dynamicznych roweru górskiego (cz. 2)

Wariant/opis	Schemat	Wariant/opis	Schemat
5a/5b zeskok na przednie koło (obrot ramy o 30°/45°)		6 uderzenie przednim kołem w przeszkodę	

Dla wariantu 4 efekt uderzenia przy zeskoku odwzorowano poprzez dwukrotne zwiększenie wartości każdej z sił w stosunku do wariantu 1 [5, 7]. Dla wariantu 5 efekt uderzenia przy zeskoku odwzorowano poprzez trzykrotne zwiększenie wartości każdej z sił w stosunku do wariantu 1, a ponadto zmieniono sposób podparcia modelu. Zastosowano podparcie przegubowe nieprzesuwne piasty koła przedniego oraz podparcie przegubowe przesuwne piasty koła tylnego.

4. Analiza wytrzymałości i sztywności wybranych elementów konstrukcyjnych roweru górskiego

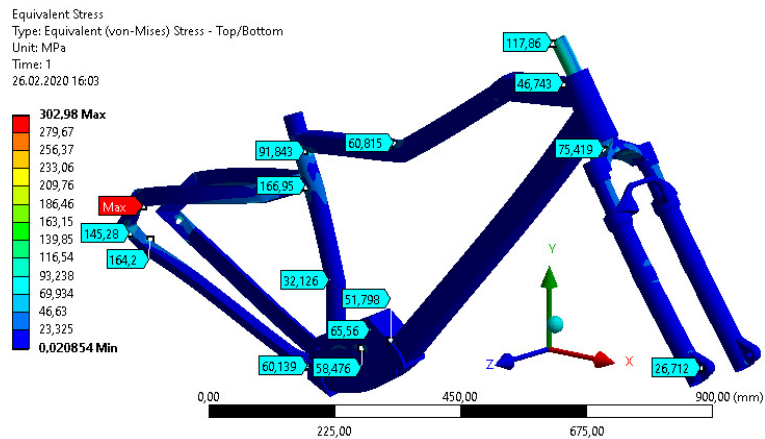
Analizy numeryczne przeprowadzono w programie ANSYS Workbench 19.1. W pierwszej kolejności dla każdego wariantu obciążeń wykonano obliczenia naprężeń zredukowanych, a następnie porównano ich maksymalne wartości. Na rysunkach 3-6 przedstawiono wybrane wyniki analiz. Na rys. 3 pokazano rozkład naprężeń zredukowanych w ramie oraz widelcu przednim odpowiadający obciążeniom przekazywanym na konstrukcję podczas normalnej jazdy, tzn. pedałowania w pozycji siedzącej (wariant 1).



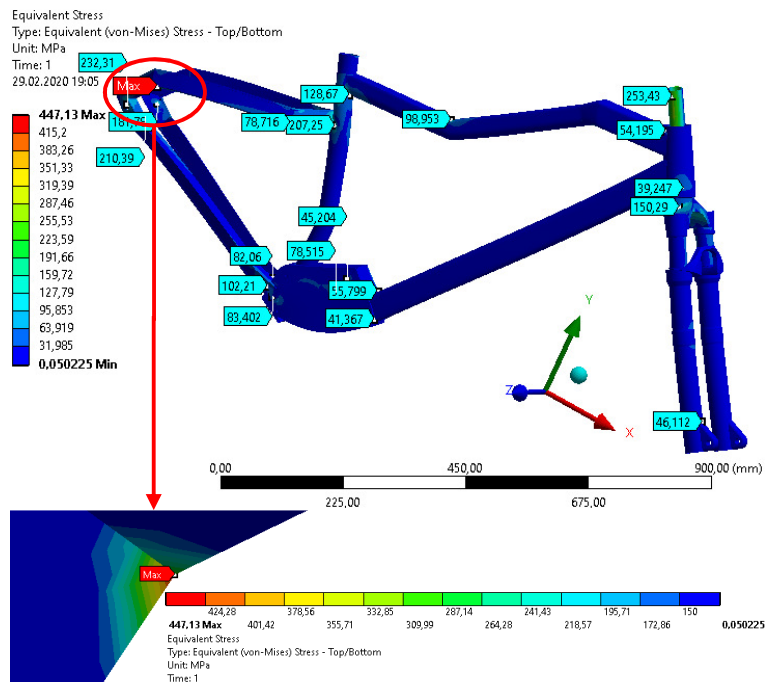
Rysunek 3. Rozkład naprężeń zredukowanych dla wariantu 1 (pedałowanie w pozycji siedzącej)

Na kolejnych rysunkach zaprezentowano rozkłady naprężeń zredukowanych odpowiadające obciążeniom oddziałującym na konstrukcję roweru w przypadku

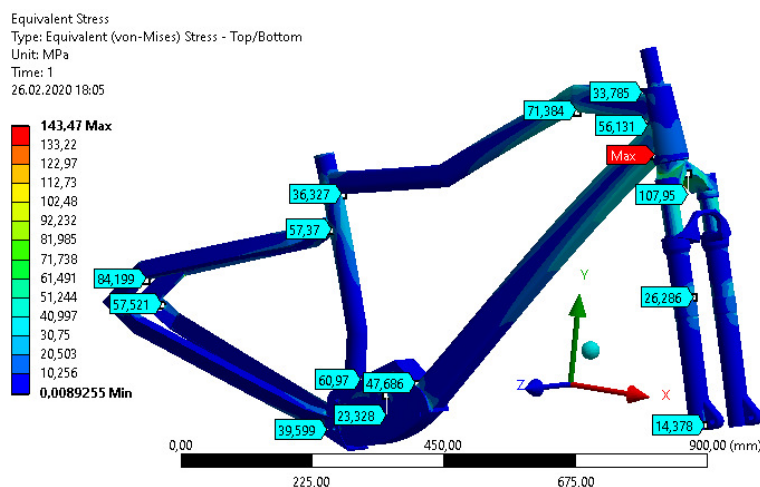
najczęściej występujących podczas jazdy w terenie zdarzeń o nagłym charakterze, takich jak zeskok na oba koła (rys. 4), zeskok na przednie koło (rys. 5) i uderzenie przednim kołem w przeszkodę (rys. 6). Porównania maksymalnych naprężeń zredukowanych dla wszystkich wariantów obciążeń dokonano na rys. 7.



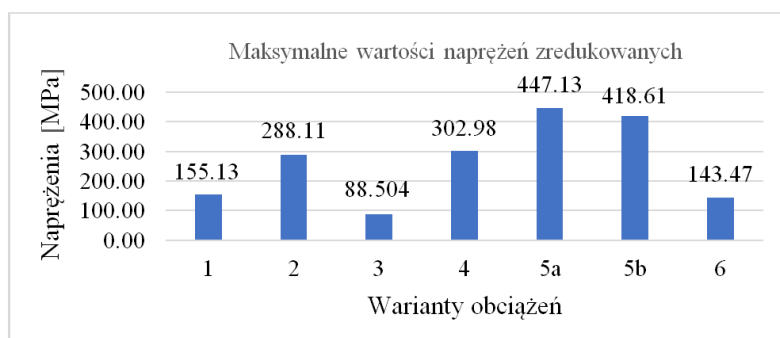
Rysunek 4. Rozkład naprężeń zredukowanych dla wariantu 4 (zeskok na oba koła)



Rysunek 5. Rozkład naprężeń zredukowanych dla wariantu 5a (zeskok na przednie koło – rama obrócona o kąt 30°)



Rysunek 6. Rozkład naprężeń zredukowanych dla wariantu 6 (uderzenie przednim kołem w przeszkodę)



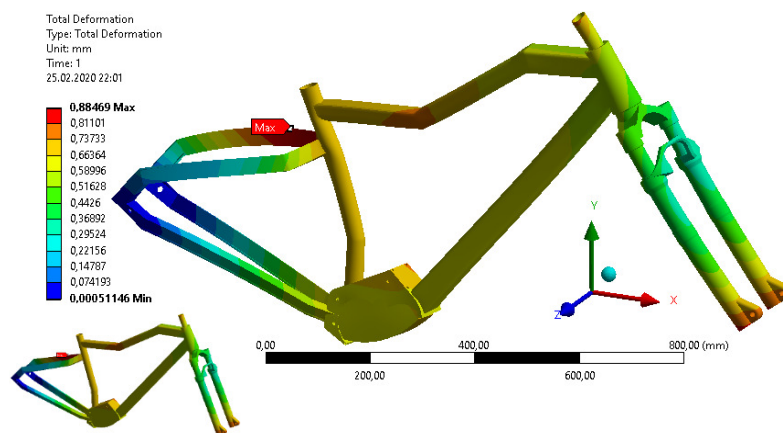
Rysunek 7. Porównanie maksymalnych naprężeń zredukowanych

Z porównania maksymalnych naprężeń zredukowanych (rys. 7) wynika, że największe naprężenia występują przy zeskoku na przednie koło (wariant 5), nieco mniejsze naprężenia, ale także wyraźnie przekraczające granicę plastyczności występują przy zeskoku na oba koła (wariant 4), natomiast naprężenia, których maksymalna wartość jest zdecydowanie mniejsza od granicy plastyczności występują tylko w przypadku uderzenia przednim kołem w przeszkodę (wariant 6).

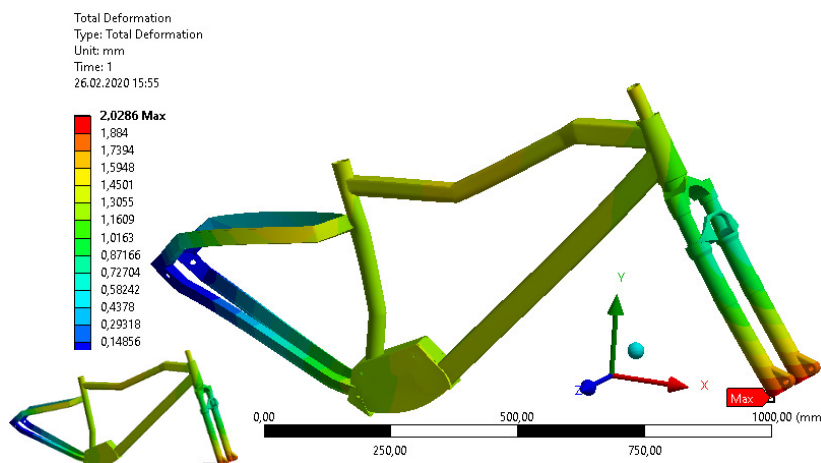
Maksymalne naprężenia zredukowane dla wariantów 4 i 5 występują w tej samej lokalizacji jak dla wariantów 1 i 2. Obserwowane spiętrzenie naprężeń w wymienionych przypadkach dotyczy miejsca, w którym występuje ostra krawędź, a także następuje nagle zmiana przekroju poprzecznego tylnych widełek, a zarazem przejście z elementów skończonych typu powłokowego na elementy bryłowe (rys. 5). W związku z powyższym, przyczynę zawyżenia naprężeń poza lokalnym karbem mogą stanowić także błędy wynikające z nieprawidłowej budowy i wielkości elementów skończonych we wskazanej lokalizacji.

Aby ustalić na ile sztywna jest konstrukcja roweru [11], dla każdego wariantu obciążeń wykonano obliczenia deformacji całkowitych (tzn. wypadkowych

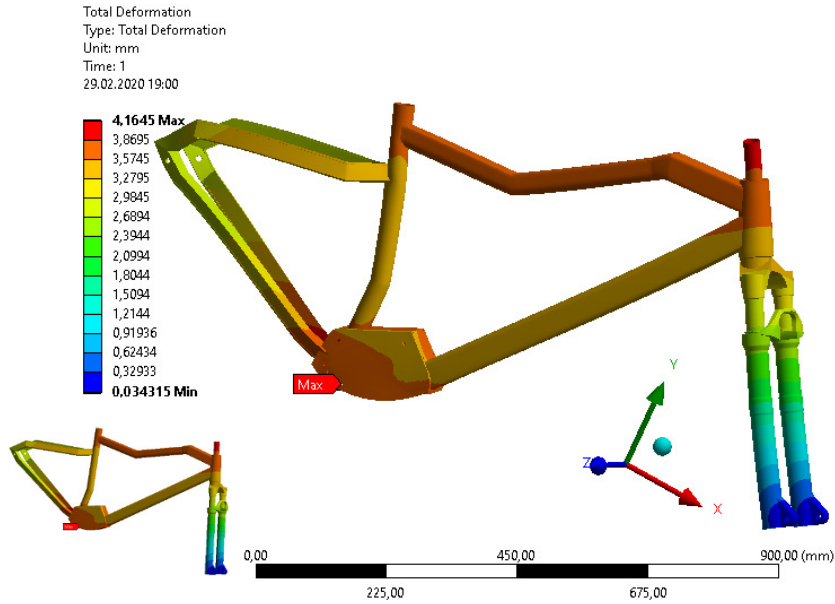
przemieszczeń węzłów), a następnie porównano ich maksymalne wartości. Na kolejnych rysunkach przedstawiono wyniki analiz dla tych samych wariantów, dla których pokazano warstwicę naprężeń zredukowanych. Zgodnie z powyższym na rys. 8 przedstawiono obraz deformacji całkowitych w ramie oraz widełcu przednim odpowiadający obciążeniom przekazywanym na konstrukcję podczas pedałowania w pozycji siedzącej (wariant 1). Na rys. 9 pokazano deformacje całkowite jakie powstają przy zeskoku na oba koła (wariant 4). Na rys. 10 pokazano deformacje całkowite jakie powstają przy zeskoku na przednie koło (wariant 5). Z kolei na rys. 11 pokazano deformacje całkowite jakie powstają przy uderzeniu przednim kołem w przeszkodę (wariant 6). Porównania maksymalnych wartości deformacji całkowitych dla wszystkich wariantów obciążeń dokonano na rys. 12.



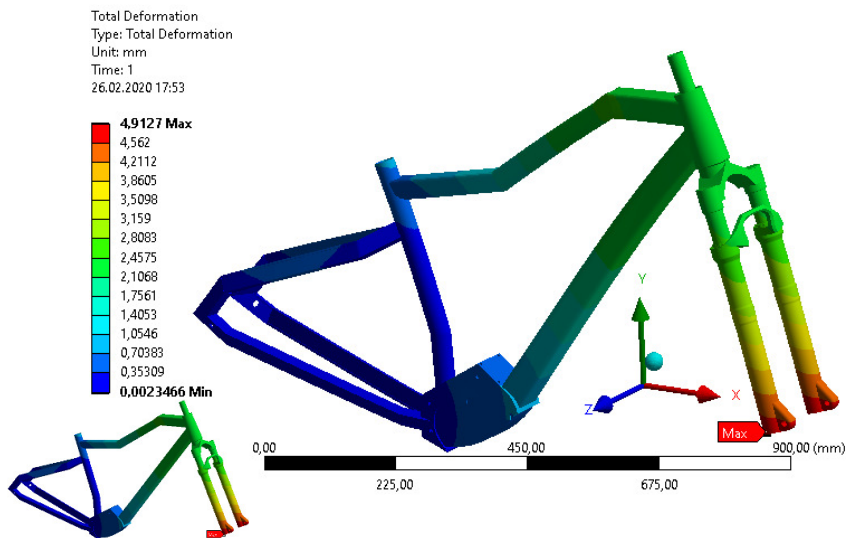
Rysunek 8. Deformacja ramy i widełek przednich dla wariantu 1 (w lewym dolnym rogu przedstawiono model przy wyłączonym skalowaniu)



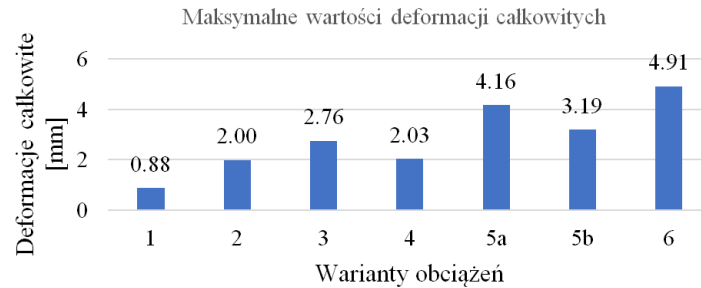
Rysunek 9. Deformacja ramy i widełek przednich dla wariantu 4 (w lewym dolnym rogu przedstawiono model przy wyłączonym skalowaniu)



Rysunek 10. Deformacja ramy i widełek przednich dla wariantu 5a (w lewym dolnym rogu przedstawiono model przy wyłączonym skalowaniu)



Rysunek 11. Deformacja ramy i widełek przednich dla wariantu 6 (w lewym dolnym rogu przedstawiono model przy wyłączonym skalowaniu)



Rysunek 12. Porównanie maksymalnych deformacji całkowitych

Z porównania wartości maksymalnych deformacji całkowitych (rys. 12) wynika, że największych odkształceń doznają widełki przednie (wariant 6), jednak biorąc pod uwagę towarzyszących tym deformacjom poziom naprężeń, można uznać, iż materiał użyty do ich wykonania został właściwie dobrany. Duża deformacja występuje także w obrębie ramy roweru przy zeskoku na przednie koło (wariant 5a). W tym przypadku, podobnie jak dla wariantu 6, naprężenia w najbardziej zdeformowanych częściach ramy są na tyle małe, że również można uznać, iż materiał użyty do wykonania ramy został właściwie dobrany.

5. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono model obliczeniowy roweru górskiego z centralnie umieszczonym, wspomagającym napęd, silnikiem elektrycznym i amortyzowanym widełcem przednim. Analizy numeryczne przeprowadzono w programie ANSYS Workbench 19.1 dla sześciu wariantów obciążenia modelu obliczeniowego. Analizy przeprowadzono w celu sprawdzenia, jak zabudowa silnika elektrycznego oraz ogniw zasilających w ramie roweru górskiego wpływa na wytrzymałość oraz sztywność wybranych elementów jego struktury nośnej, zarówno podczas normalnej jazdy, tzn. pedałowania w pozycji siedzącej, jak i najczęściej zachodzących zdarzeń o krótkotrwałym bądź nagłym charakterze, jakie mogą wystąpić w trakcie jazdy rowerem górskim.

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że:

- W miejscach, które ze względu na zabudowę elementów związanych z napędem elektrycznym różnią się konstrukcyjnie od typowych rozwiązań, nie występują żadne lokalne koncentracje naprężeń.
- Za wyjątkiem jednego miejsca w strukturze ramy, w którym następuje nagle zmiana przekroju poprzecznego tylnych widełek oraz gwałtowne załamanie powierzchni łączonych elementów o charakterze karbu, naprężenia zredukowane w żadnym innym miejscu nie przekraczają granic plastyczności zastosowanych do budowy roweru materiałów.
- Pojawiające się zwiększone naprężenia na łączeniach poszczególnych części konstrukcji pokrywają się z miejscami występowania uszkodzeń, jakie zdarzają się przy niewłaściwym użytkowaniu rowerów górskich (rys. 13).



Rysunek 13. Przykłady pęknięć i złamań ram rowerów górskich

LITERATURA

1. WASIK E., CZECH P., FIGLUS T., TUROŃ K., KAŁUŻA R.: Rower elektryczny jako przyszłość ekotransportu. *Autobusy - Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 6 (2018), 771–779.
2. TYSZKO T.: Górski Rower Elektryczny/E-MTP (HARDTAIL). Dostępny w Internecie: https://portal.bikeworld.pl/artykul/porady/przeglad_rynku/16946/jaki_gorski_rower_elektryczny_e_mtb (dostęp: 10 czerwiec 2019).
3. <https://www.bikester.pl/haibike-sduro-hardnine-20-rower-elektryczny-hardtail-biay-czarny-861793.html> (dostęp: 23 maj 2019).
4. CHOMKA G., CHUDY J., KONDASZEWSKI M.: Badania symulacyjne wytrzymałości ramy rowerowej z kształtowników i uniwersalnych łączników. *Autobusy - Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 9 (2018), 117–122.
5. NIESTEROWICZ B., JASTRZĘBSKI D.: Obliczenia wytrzymałościowe ramy roweru miejskiego. *Modelowanie Inżynierskie*, 61 (2017), 33-38.
6. CONVILL D., BEGG S., ELTON E., MILNE M., MORRIS R., KATZ T.: Parametric finite element analysis of bicycle frame geometries. *Procedia Engineering*, 72 (2014), 441–446.
7. DEVAIAH B.B., PUROHIT R., RANA R.S., PARASHAR V.: Stress Analysis of a Bicycle Frame. *Materials Today: Proceedings*, 5 (2018), 18920–18926.
8. SODEN P. D., ADEYEFA B. A.: Forces Applied To a Bicycle During Normal Cycling. *J. Biomechanics*, 12 (1979), 527-541.
9. XIANG Z., TIAN G., XU W.: Load on bicycle frame during cycling with different speeds and gestures. *Transactions of Tianjin University*, 17 (2011), 270-274.
10. Serwis internetowy: <https://www.bikester.pl/przewodnik-po-rowerach-elektrycznych/silniki.html> (dostęp: 2 czerwiec 2019).
11. PETERSON L., LONDRY K.: Finite-Element Structural Analysis: A New Tool for Bicycle Frame Design. The Strain Energy Design Method. Dostępny w Internecie: <https://www.sheldonbrown.com/rinard/fea.html> (dostęp: 10 czerwiec 2019).