

Modernizacja konstrukcji ramy pojazdu startującego w zawodach Shell Eco-marathon

Krzysztof Ochałek, Damian Durał

1. Wstęp

Shell Eco-marathon to międzynarodowe studenckie zawody sięgające swą historią roku 1985. Zespoły z całego świata mają za zadanie samodzielnie zaprojektować i zbudować pojazd ukierunkowany na minimalizację zużycia paliwa. Podczas tych zawodów spalanie określa się poprzez dystans, jaki pokonałaby dana konstrukcja na ekwiwalencie jednego litra paliwa. Charakter zmagania sprawia, że młodzi konstruktorzy dzięki swoim świeżym umysłom i kreatywności dostarczają niekonwencjonalne rozwiązania dla przemysłu motoryzacyjnego i jego gałęzi. Zawody dzielą się na dwie kategorie Urban Concept i Prototype. W pierwszej z nich startują pojazdy, które muszą być w pełni przystosowane do ruchu drogowego, wyglądem przypominają samochody poruszające się po drogach, wyposażone są m.in. w światła, kierunkowskazy czy też wycieraczki. Druga z kategorii – Prototype – pozwala na dowolność konstrukcji, większość pojazdów startujących w tej kategorii to trzykołowce o niezwykle opływowym kształcie, małej masie i niskich oporach toczenia. Mimo różnic obu kategorii cel jest jeden: projekt i budowa niskoenergetycznych pojazdów ekologicznych.



Rys. 1. Bolid SAW

Studenckie Koło Naukowe Rotor Krosno w zawodach SEM startuje od roku 2016, zdobywając nowe doświadczenia. Na podstawie wnikliwych analiz, danych z testów i zawodów wprowadzane są corocznie nowe zmiany w konstrukcji bolidu SAW (rys. 1). Zmiany, jakie zostały wprowadzane w ciągu minionych lat, przynoszą oczekiwane rezultaty, czego dowodem jest coraz mniejsze zużycie paliwa przez bolid (rys. 2).

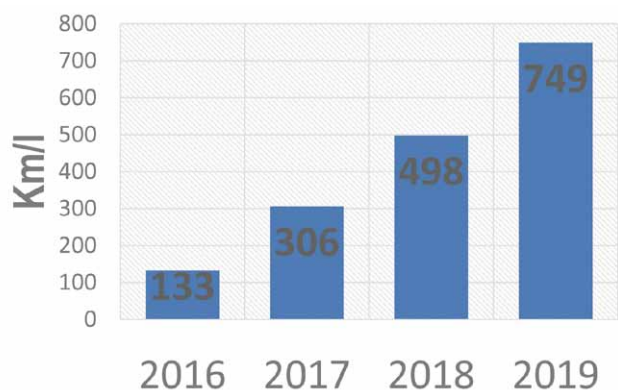
Podczas zawodów w Londynie w 2018 roku na nagraniu z kamery umieszczonej wewnątrz pojazdu zauważono, że w momencie wjechania koła przedniego w dołek na drodze

Streszczenie: W pracy ukazano przebieg procesu modernizacji ramy pojazdu ekologicznego startującego w międzynarodowych zawodach Shell Eco-marathon. Przedmiotem badań była analiza sztywności konstrukcji ramy, która podczas poruszania się bezpośrednio wpływa na geometrię układu jezdnego. W celu określenia rzeczywistych sił działających na ramę w wybranych punktach zmierzono drgania czujnikiem 3D. Na podstawie amplitudy drgań i rozkładu mas określono wielkość sił dynamicznych, działających na koła jezdne. Wykorzystując środowisko SolidWorks, zmodernizowano konstrukcję ramy, a następnie poddano ją analizie metodą elementów skończonych. W pierwszym etapie analiz zaprojektowaną ramę traktowano jako obiekt belkowy, co umożliwiło określenie rozmieszczenia poszczególnych elementów konstrukcji oraz wstępne dobranie profili ramy. Następnie wykonano analizy konstrukcji traktowanej jako element bryłowy. Ostatnim z etapów prac była analiza wytrzymałości zmęczeniowej. W wyniku przeprowadzonych działań stworzono nową ramę o konstrukcji kratownicowej charakteryzującą się większą sztywnością oraz mniejszą wagą.

Słowa kluczowe: sztywność, pojazd ekologiczny, Shell Eco-marathon

Abstract: The article presents the course of the modernization process of the ecological vehicle frame taking part in the international Shell Eco-marathon competition. The subject of the study was the analysis of the frame structure rigidity, which when moving directly affects the geometry of the steering system. To determine the actual forces acting on the frame at selected points, vibration was measured with a 3D sensor. The magnitude of dynamic forces acting on the wheels was determined on the basis of vibration amplitude and mass distribution. Using the SolidWorks environment, the frame structure was modernized and then subjected to finite element analysis. In the first stage of the analysis, the designed frame was treated as a beam object, which made it possible to determine the location of individual structural elements and pre-select the frame profiles. Then, analyzes of the structure treated as a solid element were made. The last of the stages of work was the analysis of fatigue strength. As a result of the activities carried out, a new truss frame was created with greater rigidity and less weight.

Keywords: rigidity, ecological vehicle, Shell Eco-marathon



Rys. 2. Wyniki bolidu SAW uzyskane na zawodach Shell Eco-marathon

zmieniała się geometria układu jezdnego, co niosło ze sobą zwiększenie oporów ruchu. Bezpośredni wpływ na to zjawisko miała zbyt niska sztywność ramy nośnej pojazdu. W celu określenia i zaprojektowania nowej ramy zmierzono rozkład sił statycznych i dynamicznych na poszczególne koła. Znając wartości sił, podczas projektowania nowej konstrukcji ramy wyznaczano wstępnie położenia poszczególnych elementów konstrukcji belkowej oraz dobrano przekroje poprzeczne profili. Kolejnym krokiem modernizacji ramy było przekonwertowanie modelu belkowego na bryłowy i wykonanie analiz numerycznych metodą elementów skończonych. W wyniku przeprowadzonych prac powstała nowa rama o niższej masie i wyższej sztywności, co zaowocowało poprawą wyniku uzyskanego podczas zawodów w Holandii w roku 2019.

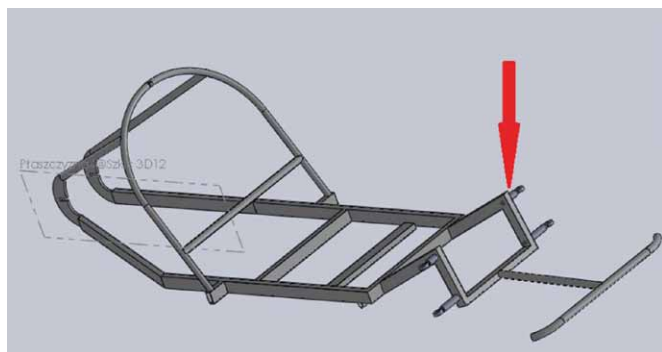
2. Pomiar rozkładu sił statycznych i dynamicznych

W celu modernizacji konstrukcji ramy pod kątem zwiększenia sztywności konieczne było określenie rzeczywistych wartości sił działających na poszczególne elementy ramy. W tym celu w miejscu mocowania zwrotnicy koła przedniego zamontowano akcelerometr (rys. 3) i podczas jazdy testowej na nawierzchni odzwierciedlającej warunki panujące podczas zawodów zarejestrowano wartości przyspieszeń.

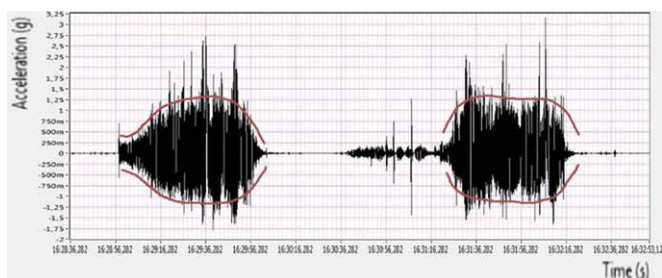
Wynikiem tego jest wykres przyspieszeń w osi pionowej, rys. 4. Obszar znajdujący się wewnątrz pola zakreślonego czerwonymi liniami – to strefa zanieczyszczeń sygnałowych pochodzących od pracującego silnika, wirujących elementów układu napędowego i jezdnego oraz drobnych nierówności jezdni. Podczas przejazdu powrotnego zostało zarejestrowane największe przyspieszenie, które po obróbce dało sumaryczny wynik na poziomie 3,5 g. Siły statyczne działające na poszczególne koła jezdne zostały zmierzone za pomocą wagi.

Dane:

- $m_1 = 25$ kg – masa pojazdu przypadająca na koło prawe;
- $m_2 = 25$ kg – masa pojazdu przypadająca na koło lewe;
- $m_3 = 46$ kg – masa pojazdu przypadająca na koło tylne;
- 3,5 g – maksymalna wartość przyspieszenia w kierunku normalnym do nawierzchni;
- $\mu = 1,1$ – współczynnik tarcia (opona-asfalt);
- $g \sim 9,81 \frac{m}{s^2}$ – przyspieszenie ziemskie.



Rys. 3. Miejsce mocowania akcelerometru



Rys. 4. Zarejestrowane wartości przyspieszenia w kierunku normalnym do jezdni

Wartości sił dynamicznych (F_d) w kierunku normalnym do powierzchni jezdni obliczono wg wzoru numer 1:

$$F_d = 3,5 \text{ g} \times m_{(1,2,3)} \quad (1)$$

Wartości siły hamowania i siły odśrodkowej (T_{\max}) przyjęto jako maksymalne wartości, przy których nie nastąpi poślizg koła względem jezdni, obliczone według wzoru numer 2:

$$T_{\max} = m_{(1,2,3)} \times \mu \quad (2)$$

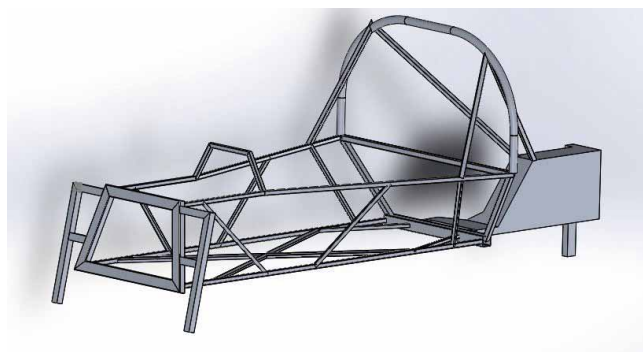
Tabela 1. Wartości sił działających na konstrukcję

	Wartość siły obciążenia statycznego [N]	Wartość siły obciążenia dynamicznego [N]	Siły hamowania [N]	Siły odśrodkowe [N]
Przednie koło	245	860	270	270
Tylne koło	450	1580	495	495

3. Projekt nowej konstrukcji ramy

Znając wartości sił działających na konstrukcję, zbudowano wstępny model ramy. Elementy w nowo projektowanej konstrukcji zostały usytuowane tak, aby w procesie modernizacji maksymalnie zredukować siły gnące, przekształcając je w siły rozciągające i ściskające.

Konstrukcja oraz badania obliczeniowe zostały wykonane w oprogramowaniu komputerowym SolidWorks. Na potrzeby sprawnych obliczeń model został uproszczony, koła, zwrotnice oraz zespół przeniesienia napędu – z uwagi na znacznie wyższą sztywność w stosunku do elementów składowych



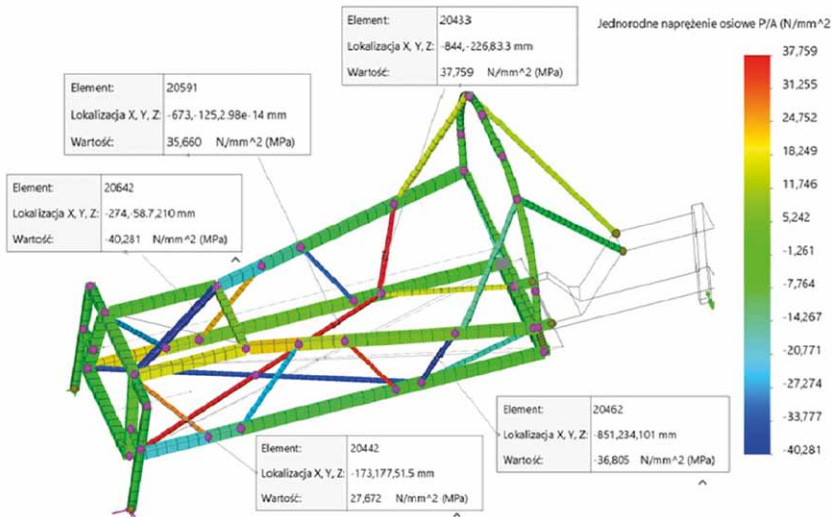
Rys. 5. Wstępny uproszczony model ramy

ramy – zostały zastąpione belkami scharakteryzowanymi jako obiekty nieodkształcalne. W miejscu, gdzie koło jedno tylne styka się z jezdnią, zastosowano utwierdzenie krawędzi modelu, odbierając wszystkie stopnie swobody. Podobnie postąpiono z jednym z przednich kół, natomiast do drugiego przyłożono siły o kierunkach, zwrotach i wartościach zgodnych z wcześniejszymi wyliczeniami. W procesie optymalizacji rozmieszczenia poprzeczek głównym parametrem sterującym były miejsce zaczepienia oraz kąt ich pochylenia. Rezultatem przeprowadzonych działań była redukcja sił zginających na rzecz ściskających i rozciągających oraz wyznaczenie wielkości profili na poszczególne elementy.

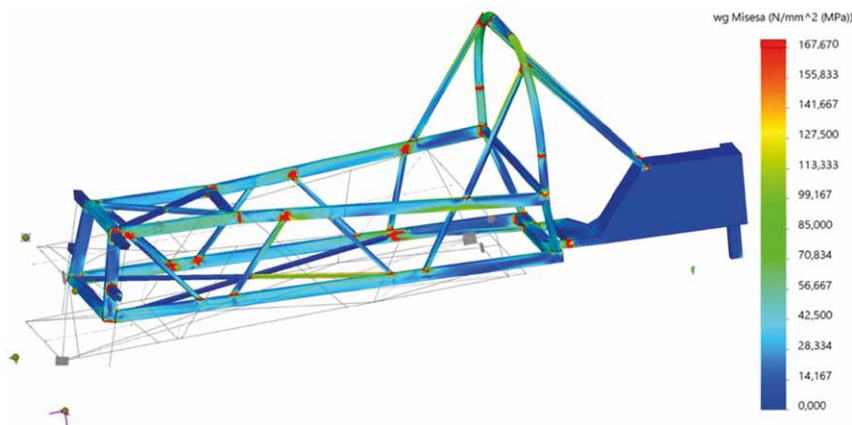
Oprogramowanie SolidWorks umożliwia obliczenie naprężeń występujących w dowolnym miejscu w badanej konstrukcji (rys. 6). Znając wartości naprężeń oraz pole przekroju zastosowanych elementów, wyznaczono wartości sił, jakie działają w każdym z elementów ramy. Kolejnym krokiem było przekonwertowanie modelu belkowego na element bryłowy i wykonanie analizy MES. W tym celu stworzono siatkę elementów skończonych opartą na krzywiznie, maksymalny rozmiar elementu siatki ustawiono na wartość połowy grubości najcieńszej ścianki modelu.

Ostateczny kształt ramy (rys. 7) wykazał się zadawalającymi parametrami, maksymalne odkształcenia konstrukcji według symulacji wyniosły 4 mm, a współczynnik bezpieczeństwa dla zastosowanego stopu aluminium 6063 w stanie T6 (stop AlMg0,7Si przesycany, starzony sztucznie) wynosi $x = 1,5$. Duża koncentracja naprężeń w wynikach symulacji wynika z błędów numerycznych spowodowanych uproszczeniem modelu i brakiem zamodelowanych połączeń spawanych, co w rzeczywistości przekłada się na nieco niższe wartości. Konstrukcja ramy po wykonaniu zgodnie z projektem i zamontowaniu kół jezdnych została poddana działaniu sił o wartościach zgodnych z wyliczeniami przyłożonej do jednego z kół przednich przy utwierdzeniu dwóch pozostałych. Pomiary wykonane ramieniem pomiarowym wykazały, że konstrukcja odkształcała się plastycznie o 5 mm. Różnica odkształceń pomiędzy symulacją a wynikiem rzeczywistym wynika z osłabienia materiału będącego skutkiem procesu spawania i wynosi 20%.

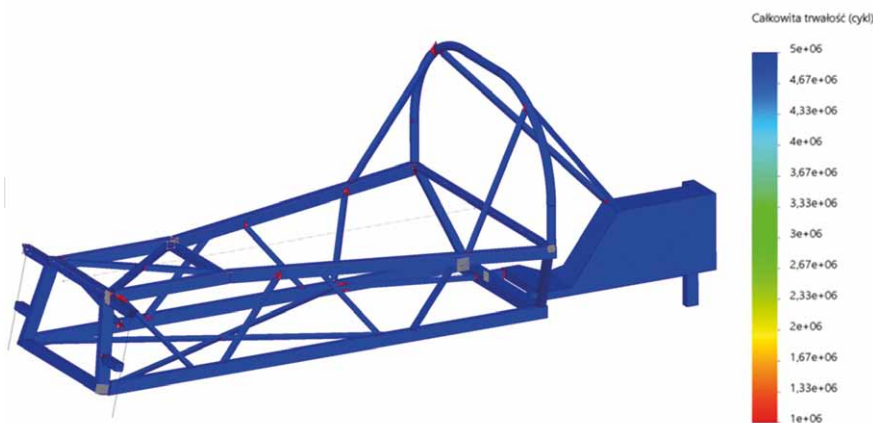
Celem określenia cyklu życia nowej ramy na podstawie analizy statycznej wykonano badania zmęczeniowe. Ustawiono sinusoidalny przebieg zmian naprężeń w czasie symetrycznym względem zera, ze stałą amplitudą równą maksymalnemu



Rys. 6. Analiza statyczna konstrukcji belkowej – jednorodne naprężenia osiowe



Rys. 7. Analiza MES konstrukcji bryłowej



Rys. 8. Analiza zmęczeniowa konstrukcji ramy

obciążeniu statycznemu oraz korekta naprężeń średnich według Soderberga. Na podstawie literatury do programu SolidWorks wprowadzono krzywą Wöhlera dla stopu 6063 w stanie T6. Trwałość konstrukcji przy zadanych wartościach sił wynosi 500 tys. cykli, co ze względu

na warunki eksploatacji można uznać za satysfakcjonujący wynik.

6. Podsumowanie

Shell Eco-marathon to zawody polegające na skonstruowaniu pojazdu ukierunkowanego na przejechanie jak

najdłuższego dystansu na jednym litrze paliwa. Uzyskanie niskiego spalania wiąże się z optymalizacją pod kątem minimalizacji oporów toczenia, wagi całkowitej pojazdu i sprawność układu napędowego. Nowa zaprojektowana rama ma wpływ na dwa pierwsze czynniki, które zostały poprawione w procesie modernizacji. Zmiany pozwoliły na zwiększenie sztywności konstrukcji oraz układu jezdnego, odkształcenia zmalały niemalże 20-krotnie względem poprzedniej konstrukcji. Pozwoliło to na zachowanie poprawnej geometrii podczas startów w zawodach, co bezpośrednio wpłynęło na zmniejszenie strat związanych z oporem toczenia. Masa ramy zmniejszyła się o 2,5 kg i obecnie wynosi 5 kg. Skutkiem wprowadzonych zmian było uzyskanie w 2019 roku wyniku 749 km/l. Rezultat ten jest lepszy o ponad 250 km względem roku ubiegłego.

Literatura

- [1] GRABARSKI A, WRÓBEL I.: *Wprowadzenie do metody elementów skończonych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
- [2] ŁODYGOWSKI T., KĄKOŁ W.: *Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003.
- [3] ROMANÓW F.: *Wytrzymałość ram i nadwozi pojazdów*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1988.
- [4] SARNOWSKI W., OLECHNO A.: *Analiza wytrzymałościowa przy wykorzystaniu modeli 3D*. Instytut Logistyki i Magazynewania, Poznań 2014.

mgr inż. Krzysztof Ochałek – Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Krośnie,
e-mail: krzysztof.ochalek@pwsz.krosno.pl;
Damian Durał – Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Krośnie,
e-mail: damian-drl@o2.pl

artykuł recenzowany