

# Główne aspekty modelowania nadwozia pojazdu konstruowanego na zawody Shell Eco-marathon

## Main aspects of modeling race car body designed for Shell Eco-marathon

ARTUR ŁACH  
MAREK WYLEŻOŁ  
WOJCIECH SKARKA \*

Przedstawiono proces modelowania powłoki nadwozia pojazdu wyścigowego startującego w kategorii *Urban* konkursu Shell Eco-marathon. Oprócz warunków wynikających z regulaminu organizatora konkursu w modelowaniu uwzględniono postać geometryczną podwozia oraz wiele kryteriów technicznych, które miały wpływ na polepszenie osiągnięć pojazdu. Ponadto dokonano analizy poprawności modelowanych krzywych i powierzchni. **SŁOWA KLUCZOWE:** modelowanie powierzchniowe, analiza krzywych i powierzchni, systemy CAx, Shell Eco-marathon

*The article refers to the process of modeling the Urban category race vehicle body shell in the context of competition Shell Eco-marathon. The modeling process was carried out taking into account the boundary conditions arising from the competition organizer's regulations, geometrical shape of the vehicle chassis and many technical criteria leading to improved performance of the race vehicle. Also, attention is paid to the aspect of accuracy analysis of the curves and surfaces of the model.*

**KEYWORDS:** surface modeling, analysis of curves and surfaces, CAx systems, Shell Eco-marathon

Shell Eco-marathon to zawody sportowe, w których uczestniczą uniwersyteckie zespoły z całego świata – zadaniem każdego z nich jest zaprojektowanie i zbudowanie energooszczędnego pojazdu. Zawody wygrywa drużyna, której pojazd zużyje najmniej energii podczas testów na wyznaczonym torze. Europejska edycja tej imprezy odbywa się w Rotterdamie, na torze ulicznym w centrum miasta. W wyścigu tym bierze udział ponad 200 drużyn, a ogląda go ponad 50 tys. widzów.

Studencki zespół Smart Power [4] z Politechniki Śląskiej staje do konkursu Shell Eco-marathon od 2012 r. (początkowo tylko w kategorii *Prototype*, a od 2014 r. również w kategorii *Urban*).

### Założenia do projektu poszycia pojazdu Bytel

Pojazd Bytel budowano zgodnie z wymaganiami określonymi dla pojazdów startujących w kategorii *Urban* konkursu Shell Eco-marathon [6]. W trakcie projektowania poszycia pojazdu należało uwzględnić wiele zależności (wynikających z konstrukcji innych podukładów i przeznaczenia pojazdu), które stały się podstawą do sformułowania kryteriów konstrukcji poszycia.

Dotyczyły one:

- minimalizacji współczynnika oporu aerodynamicznego,
- technologii wykonania poszycia i elementów z nim związanych,
- integracji podukładów pojazdu,
- ergonomii,
- spełnienia wymagań regulaminowych, w tym bezpieczeństwa.

Największym problemem okazało się zbudowanie takiego modelu powierzchniowego, który umożliwiłby w miarę elastyczne wprowadzanie kolejnych zmian wynikających

z kryteriów konstrukcyjnych. Ze względu na krótki czas realizacji projektu zdecydowano się na jednoczesne opracowanie **dwóch wersji poszycia**: docelowej i uproszczonej.

**Wersja docelowa** zakładała wykonanie poszycia kompozytowego o złożonym kształcie, wynikającym z kryterium minimalizacji oporu aerodynamicznego, w tym wyfrezowanie formy i wytworzenie poszycia w firmie zewnętrznej. **Wersja uproszczona** była swego rodzaju zabezpieczeniem, gdyż istniało duże prawdopodobieństwo, że wersja docelowa nie doczeka się realizacji w odpowiednio krótkim czasie. Uproszczenie polegało na tym, że poszycie miało się składać wyłącznie z powierzchni rozwijalnych – aby można je było łatwo i samodzielnie wykonać w warunkach warsztatowych, używając płyt z lekkiego tworzywa.

Opracowany docelowy model powierzchniowy [10, 11] musiał umożliwić nie tylko bezproblemowe i szybkie wprowadzanie zmian, lecz także wykonanie poprawnej powierzchni poszycia za każdym razem, co jest istotne z punktu widzenia uzyskiwanych wartości oporu powietrza.

Założono, że poszycie i elementy z nim związane zostaną wykonane z powierzchni nierozwijalnych, dzięki czemu łatwiej będzie osiągnąć odpowiednią sztywność poszycia i zapewnić małe opory aerodynamiczne. Wymagało to przyjęcia odpowiednich kierunków odformowania i podziału powierzchni. Jedynie szyby pojazdu zaprojektowano jako powierzchnie rozwijalne, gdyż wykonanie tych elementów jest operacją technologicznie trudniejszą.

Integracja podukładów pojazdu polegała głównie na odpowiednim dopasowaniu poszycia do struktury nośnej pojazdu – zwłaszcza do płyty podłogowej, która wraz z odpowiednią konstrukcją wzmacniającą tworzyła klatkę bezpieczeństwa kierowcy.

Kształtowanie nadwozia obejmowało również kryteria ergonomiczne, funkcjonalne i bezpieczeństwa, wynikające z regulaminu konkursu. Zastosowana tu metodyka projektowania ergonomicznego została już wcześniej wykorzystana w projektowaniu innego pojazdu [1, 2, 7, 8].

### Wymagania regulaminowe

Oprócz wymagań ogólnotechnicznych na konstrukcję pojazdów zgłaszanych do zawodów Shell Eco-marathon duży wpływ mają wymagania regulaminu wyścigu, dotyczące:

- gabarytów pojazdu,
- wymiarów związanych z przestrzenią kierowcy,
- zapewnienia kierowcy odpowiedniej widoczności.

### Proces tworzenia modelu

Modelowanie nadwozia pojazdu Bytel [4] było pierwszym z przeprowadzonych procesów projektowo-konstrukcyjnych [12]. Wcześniej wykonano liczne szkice odręczne i na ich podstawie opracowano kilka wersji nadwozia, które jednak później odrzucono ze względu na nienajlepsze własności aerodynamiczne (zbadane za pomocą symulacji numerycznych).

Proces tworzenia modelu powierzchniowego podzielono na trzy główne etapy.

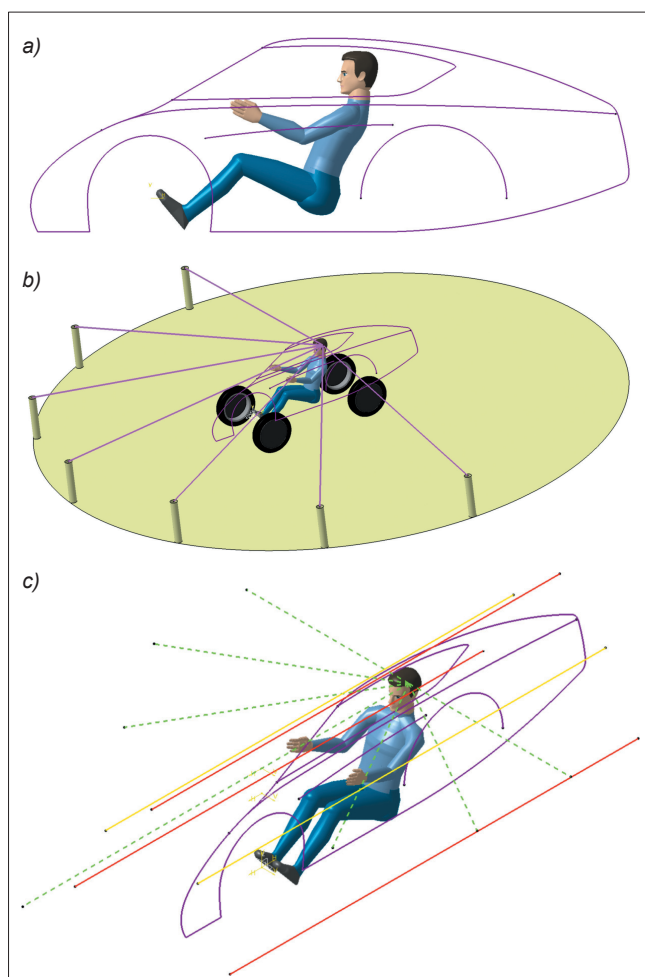
\* Artur Łach (arturlach@vp.pl), dr hab. inż. Marek Wyleżoł (marek.wylezol@polsl.pl), dr hab. inż. Wojciech Skarka, prof. PŚI (wojciech.skarka@polsl.pl) – Politechnika Śląska

■ **Etap 1. Wykonanie szkiców bazowych.** Rysunki bazowe w postaci rzutów płaskich, przedstawiających widok pojazdu z boku, przodu, tyłu i z góry, sporządzono ręcznie, wspomagając się programami graficznymi i tzw. szkicownikami systemu CATIA v5. Na rysunkach tych zachowano wymiary odpowiadające wielkościom rzeczywistym przyszłego pojazdu. Krzywe 3D oraz szkice służące do definiowania podstawowych powierzchni modelu często wymagają wielokrotnego edytowania [3, 10, 11], dlatego warto je tworzyć z wykorzystaniem wcześniej przygotowanych rysunków bazowych, które stanowią zarys koncepcji. W przypadku omawianego nadwozia pojazdu jego modelowanie oparto na jednym szkicu podkładowym. Na początkowym etapie prac skorzystano z możliwości, jaką oferuje moduł *Ergonomics Design & Analysis* systemu CATIA v5, i wykonano fantom (model kierowcy) o wzroście 165 cm (rys. 1a).

W dalszej kolejności przyjęto założenia wynikające z regulaminu konkursu. W tym celu wykonano model sceny będącej odwzorowaniem testu widoczności, jaki musi przejść każdy pojazd podczas inspekcji technicznej (rys. 1b). Zamodelowano też koła pojazdu – zgodnie z założeniami konstrukcyjnymi.

Wykreślono linie pomocnicze, ograniczające wymiary minimalne narzucone przez regulamin, a mianowicie linie (rys. 1c):

- szerokości nadwozia,
- wysokości całkowitej pojazdu,
- szerokości kabiny na wysokości ramion kierowcy.



Rys. 1. Szkic bazowy pojazdu wraz z modelem kierowcy (a), model sceny przedstawiający test widoczności (b), linie ograniczające wymiary pojazdu narzucone przez regulamin konkursu (c)

■ **Etap 2. Modelowanie powierzchni bazowych nadwozia.** Karoserie pojazdów są zazwyczaj bryłami posiadającymi płaszczyzną symetrii – przy modelowaniu uwzględniono tę cechę. Wybrane powierzchnie leżące w obszarze płaszczyzny

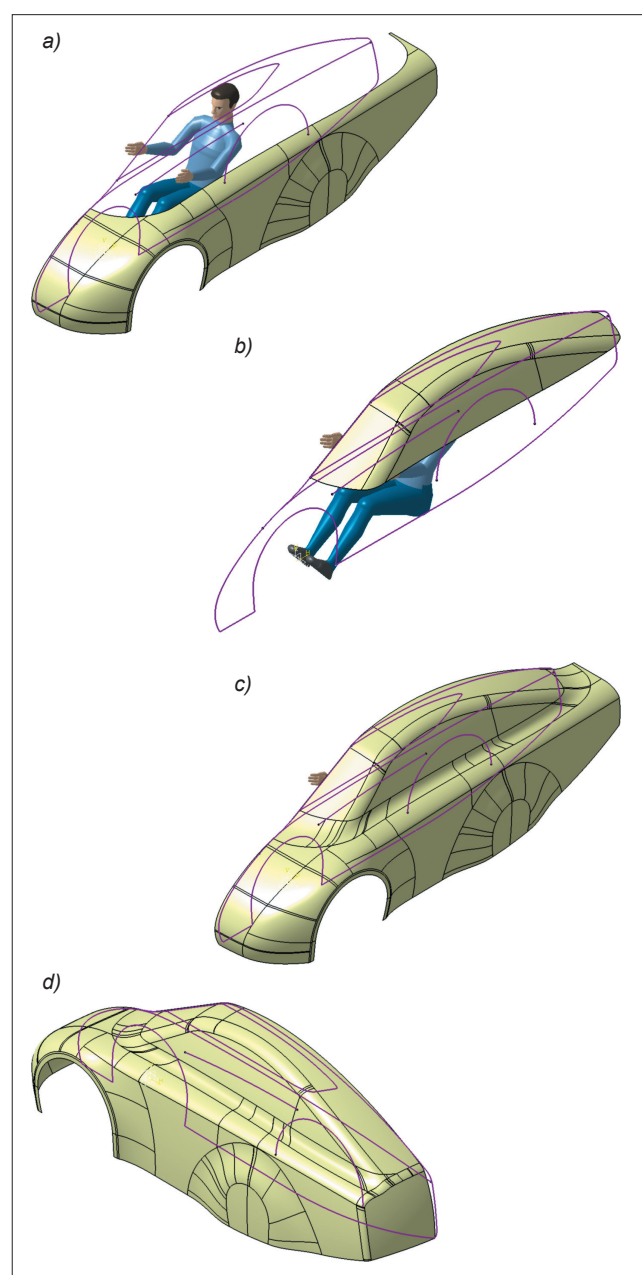
symetrii wykonywano całościowo, a następnie usuwano niepotrzebną część. Celem tych operacji było zachowanie ciągłości kolejno tworzonych płatów powierzchni [3, 10, 11].

Modelowanie rozpoczęto od utworzenia przedniego nadkola i maski samochodu, a następnie zamodelowano ścianę boczną i zakryte tylne nadkole (rys. 2a).

Gdy zarys dolnej części nadwozia był już gotowy, przystąpiono do wykonania powierzchni górnej części. Biorąc pod uwagę ewentualne trudności technologiczne związane z wykonaniem szyb, powierzchnie będące ich odwzorowaniem zamodelowano jako rozwijalne. Po utworzeniu dachu wymienione wcześniej elementy odpowiednio przycięto i połączono w całość, zapewniając płynne przejście między nimi (rys. 2b).

Tak samo postąpiono przy scalaniu obu części powierzchni modelu. Zaokrąglenia wykonano w taki sposób, aby nadać nadwoziu możliwie najlepsze własności aerodynamiczne (rys. 2c).

Ostatnią czynnością tego etapu modelowania powierzchni bazowej nadwozia było wykonanie jej tylnego fragmentu (rys. 2d).

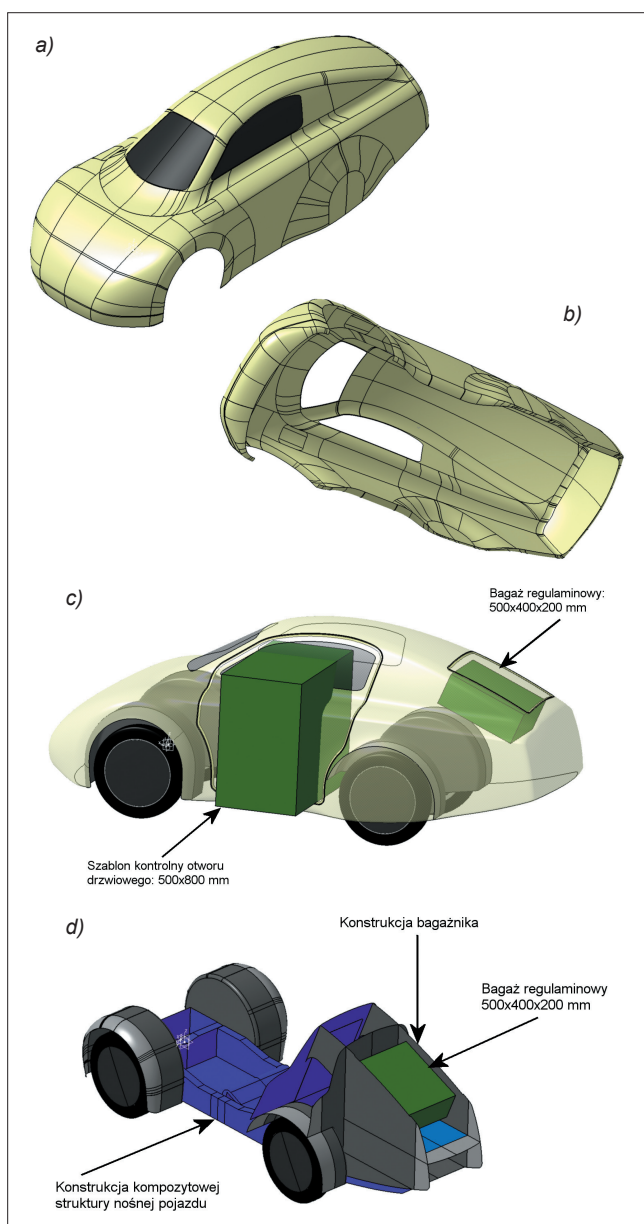


Rys. 2. Zamodelowane przednie nadkole, maska samochodu, ściana boczna i zakryte tylne nadkole (a); powierzchnie rozwijalne szyb oraz dach połączone w całość (b); dół i góra karoserii połączone w całość (c); docelowa postać bazowa modelu nadwozia pojazdu (d)

■ **Etap 3. Modelowanie dodatkowych elementów nadwozia.** Elementy takie jak szyby, drzwi, kłapa bagażnika, progi, lusterka i światła modelowano, bazując na utworzonej wcześniej powierzchni karoserii. Najpierw, wykorzystując wyniki symulacyjnych badań aerodynamicznych, dokonano zmian w obrębie przedniego nadkola i wycięto otwory na szyby (rys. 3a).

Analizy numeryczne pozwoliły na zweryfikowanie i poprawienie zamodelowanych zaokrągleń również dolnej części nadwozia, w tym zaokrągleń przedniego i tylnego zderzaka (rys. 3b), które są kluczowe z punktu widzenia minimalizacji oporów powietrza.

Następnie utworzono wewnętrzne powierzchnie nadkoli, dopasowując je do kształtu podłogi modelu i odpowiednio dzieląc (rys. 3c) – części w jasnoszarym kolorze miały zostać trwale połączone ze skorupą nadwozia, aby umożliwić m.in. jego bezproblemowe zdejmowanie. W dalszej kolejności zamodelowano drzwi i kłapę bagażnika – w tym przypadku konieczne było utworzenie zgodnych z regulaminem konkursu szablonów kontrolnych (rys. 3c), oraz elementy wewnętrzne bagażnika – ściany i wręgi, które trwale połączone z podłogą nośną pojazdu utworzą zwartą i sztywną konstrukcję (rys. 3d).



Rys. 3. Zmiana przedniego nadkola oraz wycięcie szyb (a); wykonanie i optymalizacja dolnych zaokrągleń (b); szablon kontrolny otworów drzwi i bagażnika (c); konstrukcja bagażnika – projekt kompozytowej podłogi nośnej; inż. Marcin Gleń (d)

Na końcu wykonano elementy świateł i lusterek wstecznych – zamodelowano specjalne oprawki pozwalające na odpowiednie ukształtowanie i zamocowanie taśm z diodami LED tworzącymi oświetlenie.

Prace nad ostateczną wersją poszycia mają się zakończyć w tym roku. Zgodnie z przewidywaniami docelowej wersji nadwozia nie udało się wyprodukować w zaplanowanym czasie, dlatego w poprzedniej edycji konkursu Shell Eco-marathon pojazd Bytel wystartował z poszyciem zastępczym (rys. 4).



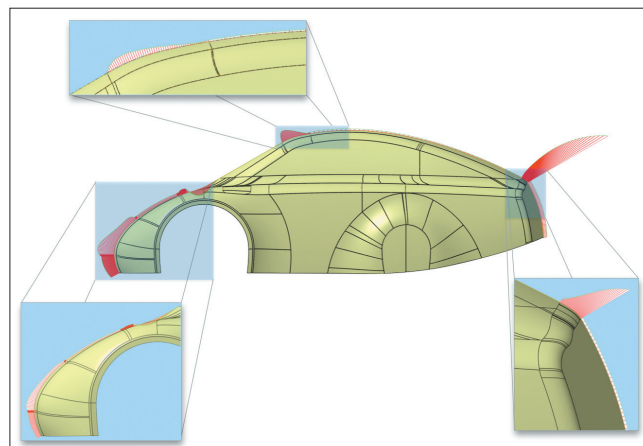
Rys. 4. Pojazd Bytel z poszyciem zastępczym podczas zawodów Shell Eco-marathon 2014 w Rotterdamie (źródło: Shell)

### Analiza krzywych i powierzchni

Modelowanie powierzchni, zwłaszcza powierzchni opartych na krzywych [3, 10, 11], wymaga nie tylko ich kształtowania, lecz także analizy ich poprawności.

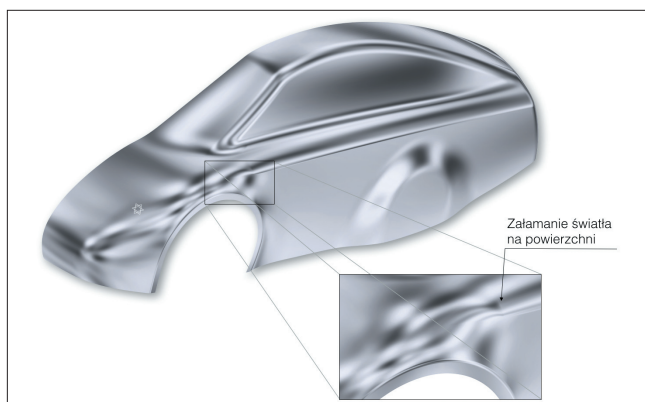
Do analizy jakości krzywych wykorzystano zaimplementowane w systemie CATIA v5 [10] narzędzia programowe o nazwie *Porcupine Analysis* (dostępne w module *FreeStyle Shaper & Optimizer*) – efekt jego zastosowania pokazano na rys. 5. Na podstawie kształtu wykresów „pióropuszkowych” można ocenić miejsca i charakter zmian wartości promieni krzywizny badanej krzywej.

Oczywiście analiza zmienności krzywizn krzywych nie jest wystarczająca – o poprawności geometrycznej modelu decyduje przede wszystkim jakość tworzących go powierzchni. Analizę ich poprawności przeprowadzono z wykorzystaniem narzędzia *Environment Mapping* (również dostępnego w module *FreeStyle Shaper & Optimizer* systemu CATIA v5 [10]), które umożliwiła optyczną ocenę jakości powierzchni na podstawie zaobserwowanych zmian kształtu – jest ona znacznie łatwiejsza dzięki efektowi widocznego lustrzanego odbicia symulowanego środowiska zewnętrznego.

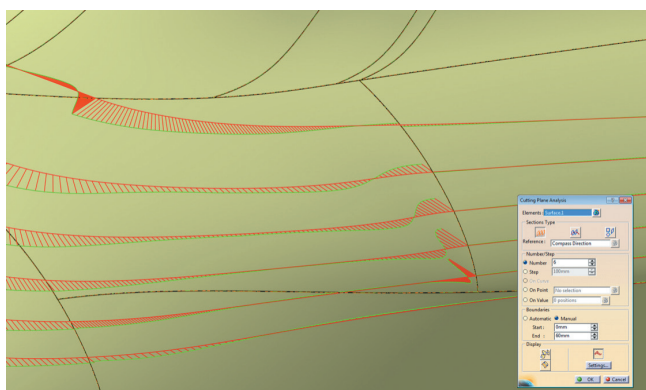


Rys. 5. Efekt wykonania analizy zmienności krzywizn krzywej przekrojowej nadwozia

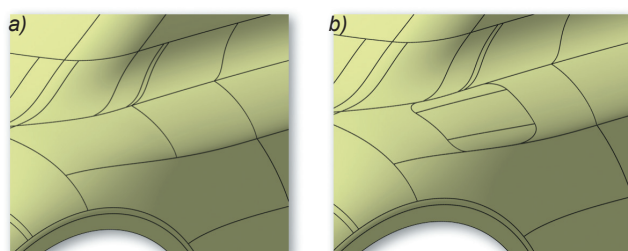
Dzięki tej analizie udało się wykryć drobne sfałdowanie powierzchni modelu w obszarze między słupkiem a przednim nadkolem (rys. 6). Potwierdzono to również w analizie zmienności krzywizn dotyczącej nierzalcznego obszaru powierzchni (rys. 7). Obrys wykresów „pióropuszkowych”



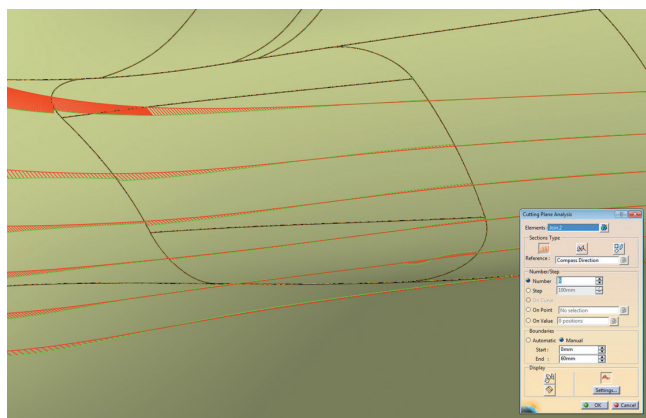
Rys. 6. Wykrycie miejscowej nierówności powierzchni dzięki zastosowaniu narzędzia *Environment Mapping* [4]



Rys. 7. Wynik analizy zmienności krzywizn poziomych krzywych przekrojowych w miejscu wykrycia nierówności powierzchni



Rys. 8. Widok fragmentu powierzchni nadwozia: a) przed usunięciem sfałdowania, b) po naprawie powierzchni



Rys. 9. Efekt wykonania analizy zmienności krzywizn poziomych krzywych przekrojowych w miejscu naprawy powierzchni

wskazuje nie tylko na gwałtowne zmiany przebiegu krzywych przekrojowych, lecz także na niezamierzone zmiany przebiegu tych krzywych – punkty przecięcia układają się wzdłuż krzywej, powodując ostre sfałdowanie powierzchni.

Za pomocą wybranych narzędzi programowych modułu *Generative Shape Design* systemu CATIA v5 [10, 11] usunięto problematyczny fragment powierzchni, a powstałą lukę wypełniono trzema nowymi płaszczyznami, które połączono zgodnie ze standardem  $G_1$  [10]. Omawiany obszar przed naprawą i po naprawie pokazano na rys. 8. Dodatkowo po zmodernizowaniu tego fragmentu powierzchni ponownie przeprowadzono analizę zmienności krzywizn krzywych przekrojowych oraz analizę lustrzanych odbić (rys. 9).

## Wnioski

- Kształtowanie poszycia pojazdu Bytel było pracochłonne i długotrwałe ze względu na jego powiązania konstrukcyjne z wieloma innymi podzespołami pojazdu.
- Podstawowym kryterium kształtowania poszycia pojazdu było uzyskanie minimalnych oporów aerodynamicznych – w tym celu wielokrotnie modyfikowano powierzchnię poszycia, odpowiednio do otrzymywanych wyników obliczeń CFD (*Computational Fluid Dynamics*).
- Modelowanie powierzchni opartych na krzywych jest bardzo pracochłonne, ale za to daje pełną kontrolę nad uzyskanym rezultatem.
- Proces modelowania powierzchni opartych na krzywych warto podzielić na etapy związane z modelowaniem poszczególnych płaszczyzn powierzchni.
- Skomplikowane powierzchnie należy podzielić na osobne fragmenty, pamiętając o zachowaniu wymaganych klas ciągłości (zwykle  $G_0$ ,  $G_1$  lub  $G_2$ ).
- Stosowanie narzędzi diagnostycznych dostępnych w modelach powierzchniowych pozwala na wczesne wykrycie ewentualnych nieprawidłowości w tworzonym modelu.

## LITERATURA

1. Hasa J., Macuda M., Skarka W. „Projektowanie bolidu wyścigowego Silesian Greenpower zorientowane na indywidualne cechy kierowców”. *Mechanik*. Nr 2 (2012), R. 85, CD-ROM: s. 1÷9, bibliogr. 4 poz.
2. Hasa J., Słowik Ł., Skarka W. „Ewolucja elektrycznych bolidów wyścigowych budowanych na Politechnice Śląskiej”. Red.: Szajnár J., Studnicki A., Suchoń J. *VIII Seminarium Studenckiego Koła Naukowego Odlewników SFEROID'2012*, Ustroń–Jaszowiec, 31 maja÷2 czerwca 2012. Gliwice: Komisja Odlewnictwa PAN, Oddział Katowice, 2012, s. 59÷64, bibliogr. 2 poz. (*Zeszyty Studenckich Prac Naukowych „Sferoid”*, z. 12).
3. Kiciak P. „Podstawy modelowania krzywych i powierzchni”. Warszawa: WNT, 2000.
4. Strona internetowa Koła Naukowego Modelowania Konstrukcji Maszyn: [www.mkm.polsl.pl](http://www.mkm.polsl.pl) (dostęp: lipiec 2014).
5. Piechna J. „Podstawy aerodynamiki pojazdów”. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2000.
6. Regulamin Shell Eco-marathon: [www.shell.com/global/environment-society/ecomarathon/events/europe.html](http://www.shell.com/global/environment-society/ecomarathon/events/europe.html) (dostęp: maj 2014).
7. Targosz M., Skarka W. „Synergia metod modelowania konstrukcji na przykładzie projektu Smart Power”. *XI Forum Inżynierskie ProCAx*. Sosnowiec, 2÷4 października 2012 r. Cz. 1., bibliogr. 9 poz. *Mechanik*. Nr 2 (2013), R. 86: s. 1÷9, CD-ROM.
8. Targosz M., Skarka W., Przyszałka P. „Simulation And Optimization Methodology Of Prototype Electric Vehicle”. Eds.: Marjanović D., Štorga M., Pavković N., Bojčetić N. *Proceedings of the 13th International Design Conference DESIGN 2014*. Dubrovnik, Croatia 2014: pp. 1349÷1360.
9. Wąsik M. „Methodology of Aerodynamic Analysis of the Cars Participating in the Race Shell Eco-Marathon Based on the Hyperworks Software”. *13th International Technical Systems Degradation Conference*. Liptovský Mikuláš, 23÷26 April 2014.
10. Wełyczko A. „CATIA V5. Sztuka modelowania powierzchniowego”. Gliwice: Wydawnictwo Helion, 2003.
11. Wyleźoł M. „CATIA. Podstawy modelowania powierzchniowego i hybrydowego”. Gliwice: Wydawnictwo Helion, 2003.
12. Zieliński A. „Konstrukcja nadwozi samochodów osobowych i pochodnych”. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2003. ■