

**KONWERSJA MATERIAŁOWO-KONSTRUKCYJNA ELEMENTU  
KUTEGO NA ODLEWANY**

**FROM FORGING TO CASTING – A CONVERSION IN BOTH  
MATERIAL AND DESIGN**

*Robert Żuczek, Stanisław Pysz, Aleksander Karwiński*

*Instytut Odlewnictwa, Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

**Streszczenie**

*Zaprezentowana praca obejmowała analizę możliwości zmiany technologii wykonywania wahacza samochodowego, przy jednoczesnej zmianie tworzywa. Zastosowanie wysokowytrzymałego żeliwa sferoidalnego pozwoliło na zmiany w konstrukcji elementu, dzięki czemu uzyskano ażurowy odlew o cienkich ściankach. Zaproponowane zmiany zmniejszyły masę elementu bez pogorszenia właściwości wytrzymałościowych konstrukcji.*

Słowa kluczowe: symulacje numeryczne, żeliwo sferoidalne, zamiana na odlew, wahacz

**Abstract**

*The study presents an analysis of the possibilities to change the fabrication technology of a rocker for automotive applications, changing also the type of material used for this element. The application of high-strength ductile iron enabled this element to be redesigned, resulting finally in the production of a grille-type, thin-walled, casting. The proposed modifications reduced the weight of the element without any harm to its mechanical properties.*

Keywords: numerical simulation, ductile iron, conversion into casting

## Wstęp

Wzrost światowych cen ropy naftowej oraz ostre normy ekologiczne dotyczące emisji spalin, zmuszają koncerny motoryzacyjne do prowadzenia prac zmierzających do zmniejszenia ilości szkodliwych produktów spalania. Od 2006 roku obowiązuje rygorystyczna norma emisji spalin Euro4 obniżająca o 30% emisję tlenków azotu (NOx) oraz cząstek (PM) aż o 80% w stosunku do wcześniejszej normy Euro3. Niektórzy producenci już obecnie mogą się pochwalić pojazdami spełniającymi wymagania normy Euro5, która będzie obowiązywać dopiero od 1 października 2009 r.

Zadanie postawione przed biurami konstrukcyjnymi sprowadza się więc do obniżania ilości spalanej paliwa. Głównym kierunkiem prowadzonych badań jest zastosowanie najnowszych materiałów i technologii w produkcji silników spalinowych, w konsekwencji do zmniejszenia zużycia paliwa w małych samochodach do poniżej 4 l/100 km. Uważa się, że zmniejszenie masy samochodu tylko o 100 kg pozwala na zaoszczędzenie ok. 1 l paliwa na 100 km [1].

Stosowanie nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych pozwala na obniżenie masy części składowych pojazdu i jest powszechne w drogich modelach samochodów sportowych, gdzie np. karoserie wykonywane są z wysokowytrzymałych włókien węglowych, a elementy silnika czy układu zawieszenia często wykonane są z ultralekkich materiałów kompozytowych. Stosowanie tego typu rozwiązań w pojazdach seryjnych spowodowałoby jednak znaczny wzrost kosztów produkcji.

Jednym ze sposobów na sprostanie tym wymaganiom jest zmniejszenie masy nieresorowanej. Oprócz prac prowadzonych nad silnikami, szczególnie ważne wydają się prace na podzespołach wchodzących w skład zawieszenia pojazdu. Na elementy zawieszenia takie jak wahacze, zaciski czy tarcze hamulcowe stosuje się coraz częściej nowoczesne stopy aluminium, jednak konstrukcje te wymagają uwzględnienia podczas analizy warunków eksploatacji, często niższych właściwości wytrzymałościowych w porównaniu np. z nowoczesnym, wysokowytrzymałym żeliwem sferoidalnym. Prowadzi to często do powiększania gabarytów oraz przekrojów w niewłaściwych miejscach konstrukcji. Stosowanie stopów aluminium jako czynnika zmniejszającego masę pojazdu było spowodowane tym iż uważano, że otrzymanie cienkościennych odlewów żeliwnych o grubości np. 4 mm jest nieopłacalne i trudne do wykonania [2]. Jednak obecny poziom techniki i prowadzone badania pozwalają na uzyskiwanie takich odlewów i z powodzeniem stosowanie ich w pojazdach mechanicznych [3].

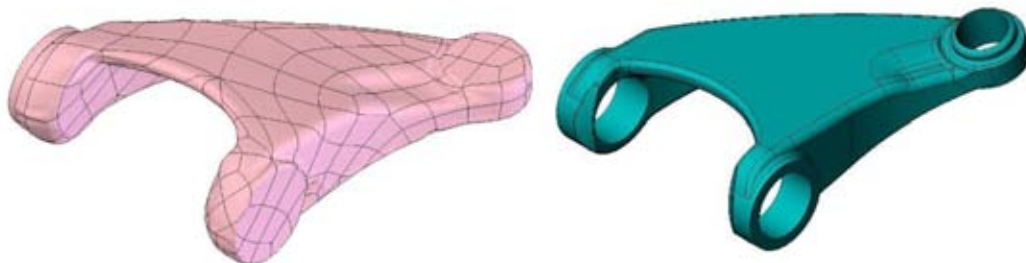
## Założenia technologiczne wykonania odlewu wahacza

Prace prowadzone w Instytucie Odlewnictwa skierowane były na zmianę technologii wykonywania wahacza jako elementu kutego na odlewany oraz zmianę tworzywa z stopu aluminium do przeróbki plastycznej PA6 na wysokowytrzymałe żeliwo sferoidalne.

Analiza możliwości konwersji zakładała, że masa nowej konstrukcji nie może być wyższa niż masa aktualnie wykonywanego wahacza, a głównym efektem wprowadzonych zmian ma być poprawa właściwości wytrzymałościowych konstrukcji.

Oryginalnie wahacz wykonywany jest ze stopu do przeróbki plastycznej PA6 przy wykorzystaniu techniki kucia matrycowego. Pierwszym etapem prowadzonych prac było wykonanie serii odlewów, przy zastosowaniu oryginalnego wahacza jako modelu odlewniczego, w celu określenia możliwości zamiany elementu kutego na odlewany.

Na podstawie oryginalnego detalu, wykonywanego jako element kuty, opracowano wirtualny model konstrukcji (poprzez zastosowanie skanowania 3D z wykorzystaniem skanera ATOS III firmy GOM), który następnie poddano obróbce w programie CAD. Do dalszej analizy przyjęto konstrukcję przedstawioną na rysunku 1.



Rys. 1. Model wahacza uzyskany z chmury punktów po skanowaniu 3D oraz bryła przygotowana w edytorze graficznym

Fig. 1. A rocker model designed from the cloud of points after 3D scanning and a solid designed by graphic editor

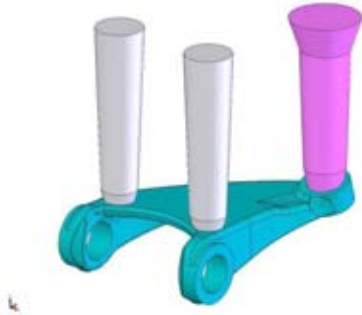
Na podstawie otrzymanego rysunku 3D, z wykorzystaniem techniki LOM wykonano papierowy model wahacza (rys. 2). Posłużył on do wykonania matrycy silikonowej na bazie której odlano z wosku serię modeli wahacza.



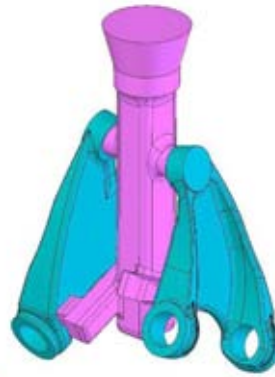
Rys. 2. Model wahacza wykonany z wykorzystaniem techniki LOM

Fig. 2. A rocker model designed by LOM technique

Próba wykonania serii żeliwnych odlewów próbnych poprzedzona została symulacją numeryczną procesu zalewania wnętrza formy z wykorzystaniem programu MAGMA-SOFT®, dla dwóch założonych technologii odlewania. W pierwszej wersji (rys. 3) odlew zalewano w pozycji poziomej, z dwoma przelewami ustawionymi na górnej powierzchni, natomiast druga zakładała odlewanie dwóch detali równocześnie (rys. 4), przy czym modele pochylono w stosunku do osi wlewu głównego, aby zapewnić prawidłowe zasilenie i kierunkowe krzepnięcie.

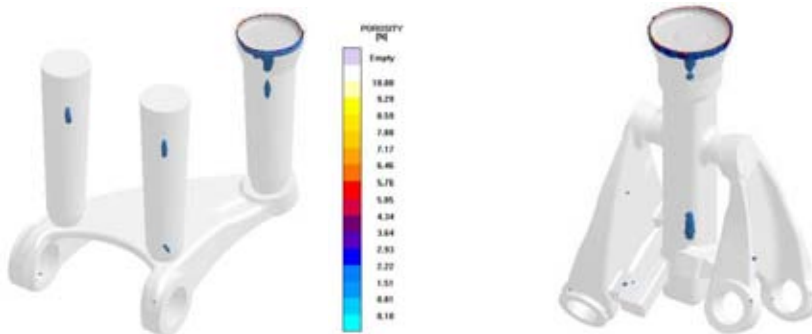


Rys. 3. Wersja I odlewania wahacza  
Fig. 3. Cast rocker in version I



Rys. 4. Wersja II odlewania wahacza  
Fig. 4. Cast rocker in version II

Wyniki z symulacji w postaci rozkładów porowatości zostały przedstawione na rysunku 5. Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych stwierdzono występowanie niewielkich skupisk porowatości w okolicach przelewów (technologia I) oraz w miejscu doprowadzenia metalu do odlewu (technologia II). Po wprowadzeniu korekty technologii polegającej na powiększeniu nadlewów i powiększeniu przekrojów wlewów doprowadzających otrzymano odlewy pozbawione wad porowatości.



Rys. 5. Rozkład porowatości w odlewie dla przyjętych technologii odlewania  
Fig. 5. Typical porosity distribution in casting

Przygotowano po dwie formy ceramiczne dla każdej z założonych technologii (rys. 6), które następnie zostały zalane żelazem sferoidalnym modyfikowanym (0,6% żelazo-krzem oraz 0,15% barinoc). Odlewy wahacza wykonane w obu technologiach przedstawiono na rysunku 7.



*Rys. 6. Forma ceramiczna przygotowana dla technologii I*

*Fig. 6. Ceramic mould ready for technology I*



*Rys. 7. Odlewy wahacza po rozbiciu form ceramicznych wykonane w technologii I i II*

*Fig. 7. As-cast rockers made by technologies I and II immediately after knocking out from ceramic moulds*

Po oczyszczeniu i odcięciu układów wlewowych otrzymane odlewy zostały prześwietlone w celu weryfikacji założonej technologii odlewania. W technologii II stwierdzono występowanie niewielkich porowatości w pobliżu układu doprowadzającego metal do odlewu. Analizy te potwierdzają więc wyniki otrzymane w symulacjach numerycznych.

## Badania właściwości wytrzymałościowych wybranych materiałów

Próbki dołączone do żeliwnych odlewów przekazane zostały do badań właściwości wytrzymałościowych w Laboratorium Badań Stosowanych w IOd. Dodatkowo wytoczono próbki ze stopu aluminium PA6 do przeróbki plastycznej, z którego wykonywany jest oryginalny wahacz. Badanie właściwości wytrzymałościowych przeprowadzono w temperaturze 20°C, w statycznej próbie rozciągania, na maszynie SCHENCK typu INSTRON 8800M. Podstawowe parametry wytrzymałościowe wybranych materiałów przedstawione zostały w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe właściwości wytrzymałościowe wybranych materiałów

Table 1. Basic mechanical properties of the selected materials

Material	E, GPa	R <sub>m</sub> , MPa	R <sub>0,2</sub> , MPa
PA6	72,5	380	230
Żeliwo sferoidalne	152,04	591	382

W powyższej tabeli zamieszczono najważniejsze właściwości wytrzymałościowe otrzymane z prób wytrzymałościowych. Do symulacji numerycznej warunków eksploatacji wahacza w programie ABAQUS wprowadzono całe krzywe  $\sigma$ – $\epsilon$ .

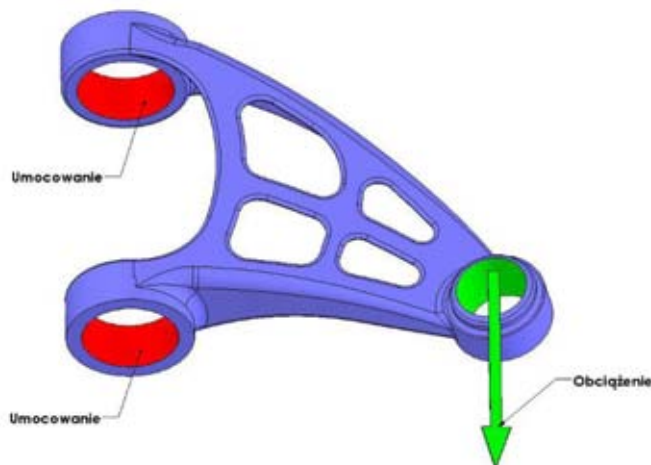
## Konwersja konstrukcji i symulacja numeryczna eksploatacji wahacza

Analizując właściwości wytrzymałościowe uzyskane w próbach, zauważyć można, że wytrzymałość stopu żeliwa jest wyższa niż materiału, z którego wykonany jest oryginalny wahacz. Należy jednak zwrócić uwagę, że elementy wykonywane w procesie kucia matrycowego, uzyskują dużo lepsze właściwości mechaniczne w kierunku kucia, niż w kierunku poprzecznym, natomiast prawidłowo zaprojektowany element odlewany gwarantuje uzyskanie równomiernego rozkładu właściwości wytrzymałościowych we wszystkich kierunkach.

Na podstawie oryginalnej konstrukcji rozpoczęto prace mające na celu konwersję aluminiowego odlewu wahacza na cienkościenny odlew wykonany z żeliwa sferoidalnego, przy założeniu zachowania takiej samej masy odlewu lub jej obniżeniu oraz poprawie właściwości użytkowych nowo opracowanej konstrukcji.

Symulacje numeryczne procesu eksploatacji nowego modelu wahacza wykonanego z żeliwa sferoidalnego przeprowadzono przy założeniu działania sił w trakcie dojechania kołem do przeszkody. Schemat zamocowania modelu i obciążeń przedstawiono na rysunku 8. Do obliczeń przyjęto następujące założenia:

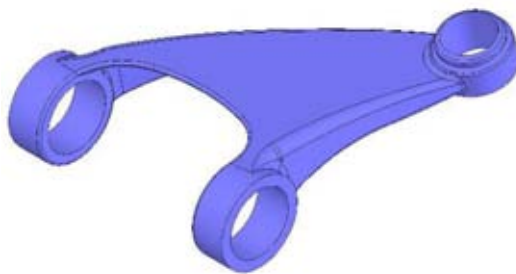
- masa pojazdu - 1200 kg,
- prędkość w trakcie najechania na przeszkodę - 10 m/s,
- brak oddziaływania pomiędzy innymi elementami zawieszenia.



Rys. 8. Schemat obciążania modelu wahacza

Fig. 8. Schematic diagram of the load values applied to a rocker model

Do wstępnej analizy przyjęto model o konstrukcji zbliżonej do wahacza oryginalnego, w którym grubość ścianki odlewu zmniejszono do ok. 3,5 mm, przy zachowaniu zbieżności odlewniczych (rys. 9). Przeprowadzone symulacje dla tej konstrukcji wykazały nieznaczny wzrost wartości naprężeń maksymalnych, jednak masa modelu w porównaniu z wahaczem rzeczywistym (kutym) była wyższa o ponad 100 g.



Rys. 9. Zmieniona konstrukcja odlewu wahacza z żeliwa sferoidalnego

Fig. 9. New modified design of a rocker cast from ductile iron

Zaproponowano więc wprowadzenie zmian mających na celu „odchudzenie” konstrukcji poprzez usunięcie materiału z miejsc, gdzie naprężenia eksploatacyjne nie przekraczały dopuszczalnych, założonych wartości naprężeń maksymalnych. Usunięto materiał z górnej, płaskiej części odlewu, tworząc otwory przedzielone żebrami wzmacniającymi, z których jedno umieszczono promieniowo, zgodnie z promieniami powierzchni bocznych, natomiast żebro poprzeczne zamodelowano prawie równoległe do kierunku działającej siły obciążającej model. Do dalszej analizy przyjęto model zaprezentowany na rysunku 10.

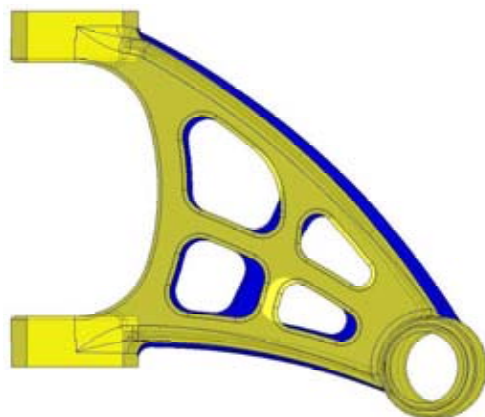




Rys. 10. Żeliwny, cienkościenny model ażurowy o zmniejszonej masie

Fig. 10. Grille-type, thin-walled, cast iron model of a rocker with reduced weight

Analizując rozkład naprężeń w ażurowym odlewie żeliwnym, stwierdzono, że maksymalne wartości naprężeń są prawie trzykrotnie wyższe niż w oryginalnym modelu wykonanym ze stopu aluminium. Rozkład naprężeń w przyjętym modelu, pomimo wzrostu ich maksymalnej wartości, jest bardziej równomierny, a czoła pól naprężeń ukierunkowane są na zamodelowane żebra. Podjęto więc próbę obniżenia maksymalnych wartości naprężeń w odlewie, poprzez zmiany promieni i wielkości otworów oraz zmianę sposobu umiejscowienia żeber wzmacniających. Wprowadzono kilka zmian konstrukcji i do ostatecznej analizy przyjęto model przedstawiony na rysunku 11 (kolor niebieski), który jest przedstawiony na tle pierwszej wersji wahacza ażurowego zaznaczonego kolorem żółtym. Masa analizowanego modelu w porównaniu z wahaczem oryginalnym jest niższa o ok. 10%.

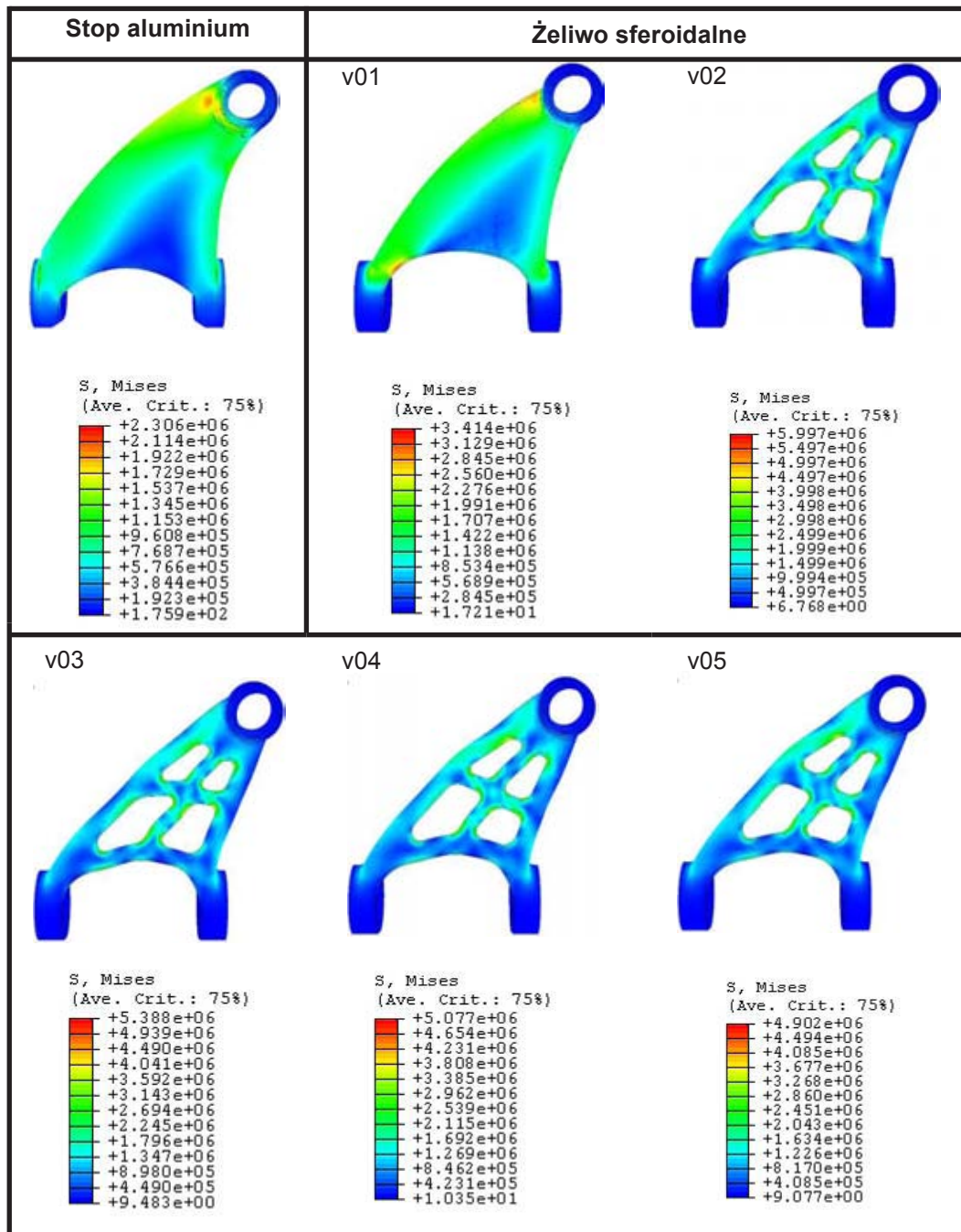


Rys. 11. Model wahacza po zmianach konstrukcyjnych otworów i żeber, na tle pierwszej wersji wahacza ażurowego

Fig. 11. A rocker model with redesigned holes and ribs seen against the background of version I of the grille-type element

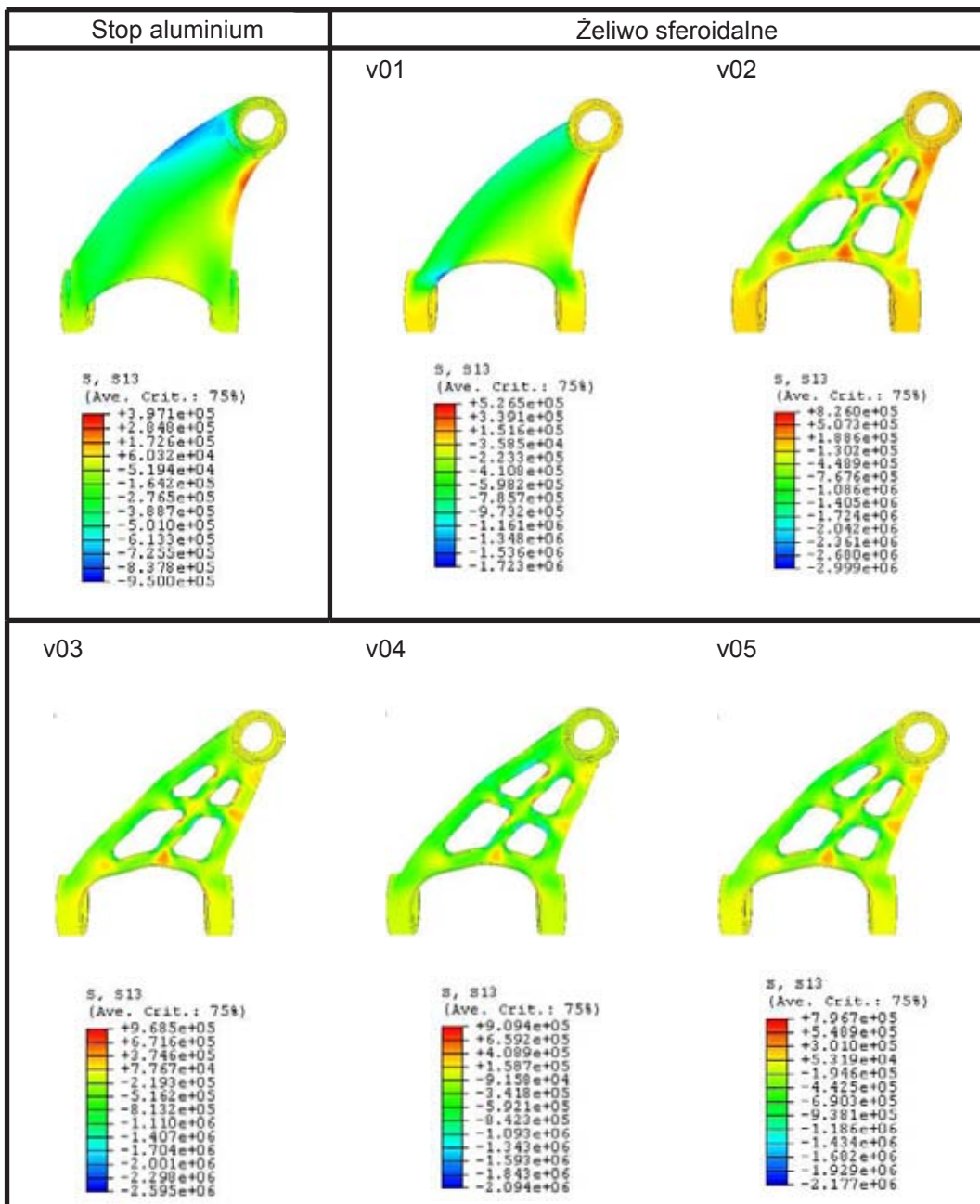
Rozkłady pól naprężeń dla odlewu oryginalnego wykonanego ze stopu aluminium PA6, „odchudzonego” modelu żeliwnego i kolejnych ażurowych wersji cienkościennego odlewu z żeliwa sferoidalnego zaprezentowano na rysunku 12.





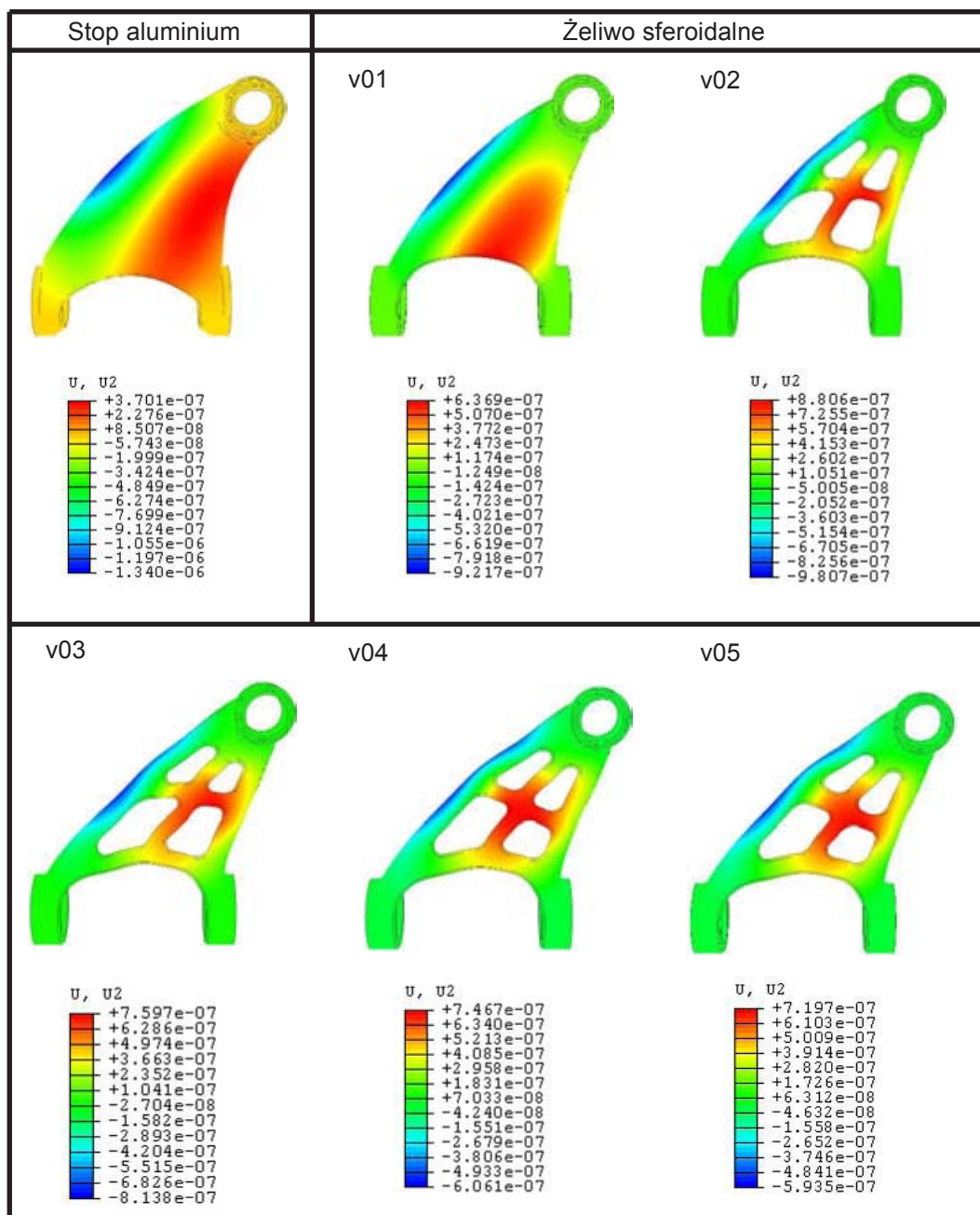
Rys. 12. Rozkład pól naprężeń w wahaczu poddanym działaniu statycznych obciążeń eksploatacyjnych

Fig. 12. Distribution of stress fields in rocker operating under the effect of static performance loads



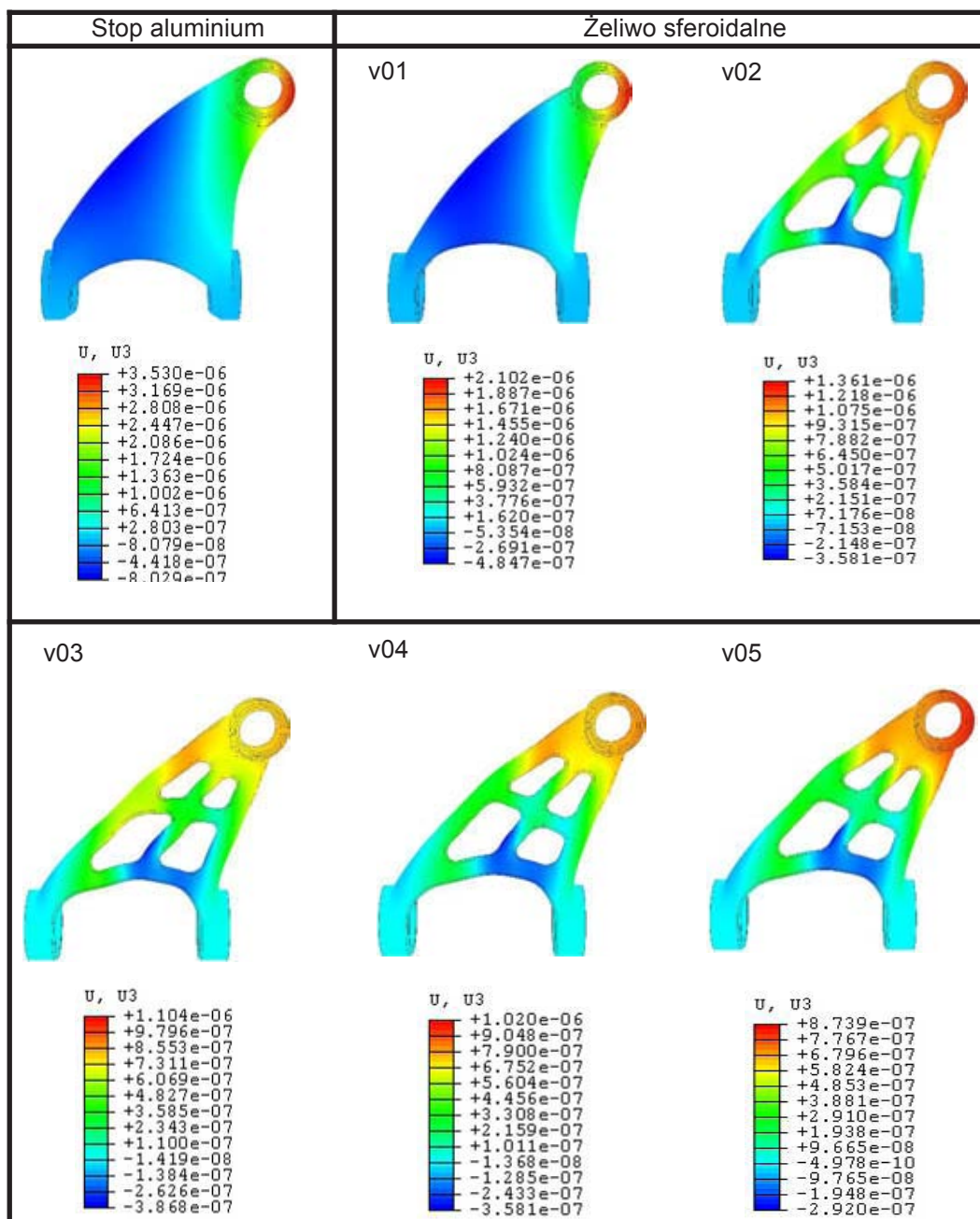
Rys. 13. Rozkład pól naprężeń  $\sigma_{13}$  w wahaczu poddanym działaniu statycznych obciążeń eksploatacyjnych

Fig. 13. Distribution of stress fields  $\sigma_{13}$  in rocker operating under the effect of static performance loads



Rys. 14. Rozkład przemieszczeń wzdłuż osi Y w wahaczu poddanym działaniu statycznych obciążeń eksploatacyjnych

Fig. 14. Distribution of displacements along the Y axis in rocker operating under the effect of static performance loads



Rys. 15. Rozkład przemieszczeń wzdłuż osi Z w wahaczu poddanym działaniu statycznych obciążeń eksploatacyjnych

Fig. 15. Distribution of displacements along the Z axis in rocker operating under the effect of static performance loads



Wyniki symulacji obciążeń eksploatacyjnych różnych modeli wahacza (rys. 12–15), pozwalają stwierdzić, że pomimo wzrostu maksymalnych wartości naprężeń w modelach ażurowych, możliwe jest zastąpienie materiału oryginalnego wahacza, przez żeliwo sferoidalne, pod warunkiem pewnych zmian w konstrukcji elementu. W analizowanym modelu ażurowym, odpowiednie zamodelowanie żeber wzmacniających pozwoliło ponad dwukrotnie zmniejszyć przemieszczenia uogólnione w górnym fragmencie wahacza oraz przemieszczenia w kierunku prostopadłym do kierunku działania siły obciążającej.



Rys. 16. Model ażurowego wahacza wykonany w technice FDM

Fig. 16. A grille-type rocker model designed by FDM technique

Przygotowano z wykorzystaniem nowoczesnej techniki szybkiego prototypowania – FDM, model pokazany na rysunku 16, który następnie posłużył do wykonania matrycy silikonowej i serii próbnej ażurowych odlewów wahacza z żeliwa sferoidalnego przeznaczonych do laboratoryjnych badań eksploatacyjnych w Instytucie Transportu Samochodowego.

Dalsze badania ażurowego odlewu wahacza dotyczyć będą możliwości wykorzystania dodatkowych modułów programu MAGMASOFT® – MAGMAIron, MAGMAFrontier oraz MAGMALink do określenia dokładnych właściwości tworzywa i technologii odlewania, jak również wyznaczenia istniejących w odlewie naprężeń odlewniczych i ich implementacji do programu ABAQUS.

## Wnioski

1. Przeprowadzone symulacje numeryczne procesu eksploatacji nowo opracowanej konstrukcji pozwalają stwierdzić, że pomimo wzrostu wartości naprężeń maksymalnych zmniejszyły się maksymalne wartości przemieszczeń.
2. Zmiana tworzywa konstrukcyjnego powoduje, że przy tych samych wartościach sił obciążających wahacz oryginalny i nowy element ażurowy, mamy dużo większy zapas bezpieczeństwa właściwości wytrzymałościowych do przekroczenia maksymalnych wartości  $R_{0,2}$  czy  $R_m$ .
3. Wykonanie elementu odlewane zamiast wykonanego w procesie kucia matrycowego, pozwoli na uzyskanie równomiernego rozkładu właściwości mechanicznych w całej konstrukcji w porównaniu z kierunkowym rozkładem tych parametrów w elemencie oryginalnym.

4. Przeprowadzona analiza umożliwi w dalszym etapie prac weryfikację praktyczną zamodelowanej konstrukcji w warunkach laboratoryjnych, a w przypadku znacznej poprawy właściwości użytkowych, na zainteresowanie koncernów motoryzacyjnych możliwością zaimplementowania zaproponowanej konstrukcji dla pojazdów użytkowych.
5. Zapoczątkowane prace pozwolą na poszerzenie asortymentu elementów mogących posłużyć jako konstrukcje do zamiany na elementy odlewane, o lepszych właściwościach użytkowych.

## Podziękowania

Autorzy składają podziękowania pracownikom Centrum Szybkiego Prototypowania i Instytutu Transportu Samochodowego zaangażowanym w realizację niniejszej pracy.

## Literatura

1. „Freedomcae And Casting” , J. Carpenter, Jr. U.S. Department of Energy, Washington, D.C., USA, International Journal of Metalcasting/Summer 08
2. “Comparative Study of fatigue endurance limit for 4 and 6 mm thin Wall Ductile Iron Castings”, C. Labrecque, M. Gagné Rio Tinto Iron & Titanium, Sorel-Tracy, PQ, Canada P. Cabanne Rio Tinto Iron & Titanium, Frankfurt, Germany C. François, C. Bécrot and F. Hoffmann PSA Peugeot Citroën, Charleville-Mézières, Cedex, France, International Journal of Metalcasting/ Summer 08
3. “Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron-Influence of Carbon Equivalent and Graphite Distribution”, P. David, J. Massone, R. Boeri and J. Sikora, ISIJ International, Vol. 44 (2004), No. 7, pp. 1180–1187

*Recenzent: prof dr hab. inż. Józef Szczepan Suchy*