Alicja **ZIELIŃSKA**

BADANIA WIRTUALNE MODELU PODPORY ZESTAWU MOSTOWEGO

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wykorzystanie metody elementów skończonych (MES) do badania modelu konstrukcji podpory przed jej wykonaniem. Badanie wirtualne modelu pozwala wzbogacić proces projektowania o wiedzę zdobytą już na etapie obliczeń inżynierskich. Metoda MES wykorzystywana do obliczeń inżynierskich umożliwia optymalizację konstrukcji poprzez badanie modelu zaprojektowanej wstępnie konstrukcji. Wykorzystanie tej metody pozwala na optymalizację procesu projektowania w Ośrodku.

1. WPROWADZENIE

1.1. Modele wirtualne

Od długiego czasu w Ośrodku wykorzystywane są techniki komputerowe do projektowania i wirtualnego badania nowoprojektowanych konstrukcji, gdyż nowe konstrukcje powstające w OBRUM w ostatnich kilku latach stawiają przed zespołem duże wyzwania Na przestrzeni lat techniki komputerowe są udoskonalane głównie poprzez możliwości techniczne, bowiem oprogramowanie stawia coraz to nowe wymagania sprzętowe. Ostatnie zmiany dokonane w Ośrodku w zakresie oprogramowania pozwalają na wykorzystywanie w pracach B+R szeregu możliwości, które jeszcze kilka lat wcześniej były tylko mrzonką. Jest to jedna strona aspektu, a drugą – jest umiejętne wykorzystywanie tych możliwości.

Ostatnie kilka lat wniosło znaczący postęp w technikach elektronicznego wspomagania prac inżynierskich stosowanych w Ośrodku. Przełom nastąpił już w 1991 roku kiedy, do projektowania przestrzennego -3D zakupiono oprogramowanie CADDS-5. Należy podkreslić, że był to pierwszy w świecie produkt do projektowania parametrycznego. Obecnie OBRUM posiada nowsze oprogramowanie również parametryczne i jest nim SolidWorks. Kompatybilnie z nim działa oprogramowanie do obliczeń metodą elementów skończonych o nazwie CosmosWorks. Jednakże nie można wykorzystywać wprost zaprojektowanych wirtualnie konstrukcji jako modeli do obliczeń inżynierskich. Częstym błędem jest mniemanie, że projekt powstały w komputerze można przeliczyć wprost bez przygotowania go do obliczeń. Owszem, może się to zdarzyć i to w przypadku pojedynczego prostego elementu konstrukcji, czyli części. Nie jest to możliwe w przypadku dość skomplikowanych elementów konstrukcyjnych czy złożeń powstałych konstrukcji. Niestety, głównie wynika to z braku możliwości w zakresie oprogramowania oraz zawartej technologii wykonania konstrukcji. Należy podkreślić, że niemal każde oprogramowanie do analiz wytrzymałościowych, pomimo stałego unowocześniania oprogramowania, wymaga przygotowywania danych dla obliczeń wytrzymałościowych. Osobnym aspektem jest, że należyte przygotowanie modelu wymaga umiejętności stworzenia go, czyli umiejętnego wprowadzania zmian, zmian niewpływających istotnie na uzyskane wyniki. Interpretacja uzyskanych wyników jest, bowiem zależna od wszystkich tych czynników łącznie.

Na przykładzie zaprezentowanej w artykule analizy podpory przedstawione zostaną różne podejścia do tematu oraz ich wpływ na wyniki obliczeń.

Mgr inż. Alicja **ZIELIŃSKA** - Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Urządzeń Mechanicznych OBRUM, Gliwice

2. KOMPUTEROWE BADANIE KONSTRUKCJI

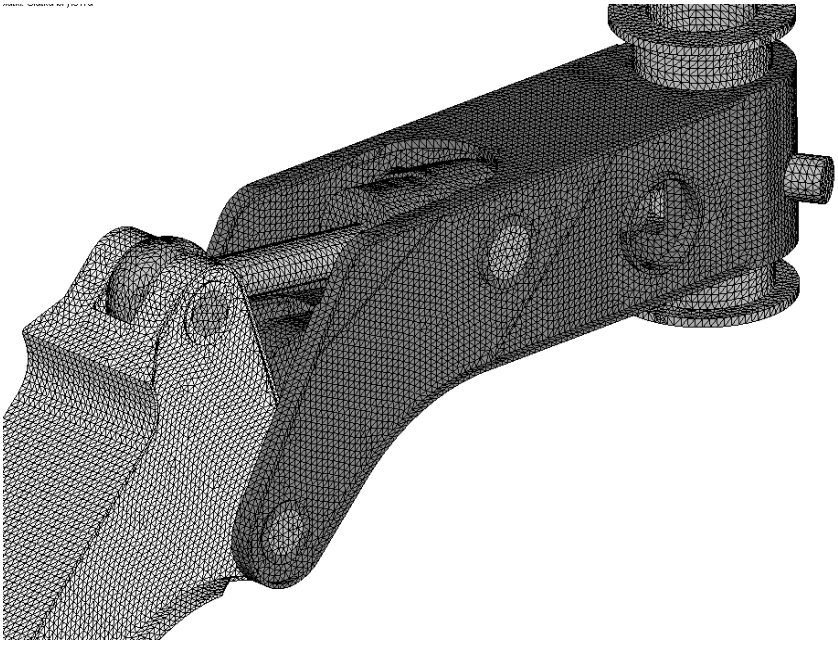
2.1. Badania wirtualne a rzeczywistość

Specyfiką badań jest umiejętność przygotowania projektu konstrukcji do obliczeń. Obecne konstrukcje często są analizowane z uwagi na bardzo silne ograniczenia masowe przy jednoczesnym spełnieniu założonych parametrów.

Jeżeli weźmiemy pod uwagę projektowanie, to w dziedzinie CAE dokonał się zawrotny postęp. Początkowo obliczenia komputerowe były zazwyczaj realizowane poprzez wykorzystanie preprocesora w użytkowanym oprogramowaniu – w Ośrodku było to oprogramowanie Cosmos/M [1]. Sprowadzało się to do przestrzennego modelowania, czyli rysowania zaprojektowanego modelu w uproszczeniu pozwalającym na dokonanie obliczeń z zachowaniem najistotniejszych uwarunkowań nie wpływających na charakter pracy badanej konstrukcji [3].

W ciągu lat, w miarę ulepszania warsztatu inżynierskiego oraz rozwoju oprogramowania, doskonaleniu ulegał proces współpracy pomiędzy bezpośrednimi projektantami i zespołem obliczeniowym. Obecnie podstawą do tworzenia modelu jest dokumentacja, najczęściej przestrzenna. Wykonana dokumentacja konstrukcyjna nastręcza kłopotów obliczeniowych i nie nadaje się wprost do wykorzystania jej do obliczeń. Na jej podstawie - bądź poprzez obróbkę modelu konstrukcyjnego i modyfikacje - należy stworzyć model gotowy do obliczeń. Uzyskanie takiego modelu jest bardzo czasochłonne w przypadku konstrukcji bardziej złożonych i wymaga pewnego doświadczenia. Największym problemem jest, by model w miarę wiernie odzwierciedlał konstrukcję, a zwłaszcza jej charakter pracy.

W chwili obecnej w zdecydowanej większości w technice projektowania przestrzennego tworzone są dosyć złożone modele. Taki projekt jest następnie weryfikowany poprzez obliczenia metodą elementów skończonych [2]. W ich wyniku projektant nanosi konieczne poprawki lub dokonuje zmian wynikłych z obliczeń i cały cykl jest powtarzany aż do utworzenia projektu końcowego. Jest to możliwe, gdyż czas trwania obliczeń uległ w ostatnich latach znaczącemu skróceniu.



Rys. 1 Model podpory z siatką bryłową - fragment

Badania wirtualne z wykorzystaniem metody elementów skończonych pozwalają nie tylko na skrócenie etapu projektowania, ale również na uzyskanie maksymalnie szerokiego zakresu wyników na etapie tworzenia modelu konstrukcji, co zostanie przedstawione na przykładzie weryfikacji konstrukcji podpory w zestawie [5],[6]. Model konstrukcji podpory został wykonany w SolidWorksie, a model bryłowy siatki (Rys. 1), składającej się z 322842 elementów oraz 592294 węzłów został utworzony i przebadany z wykorzystaniem programu CosmosWorks.

2.2. Badanie konstrukcji podpory mostu

Poniżej zaprezentowano przykładowe wyniki pracy uzyskane nad weryfikacją doboru parametrów konstrukcji podpory [5], konstrukcji na której może spoczywać cała konstrukcja zestawu mostu i w tym znaczeniu jest to najważniejszy element całego projektu. Model całej podpory składa się z dwóch zasadniczych części: modelu ramienia górnego oraz dolnego wykonanych oddzielnie, a następnie połączonych za pomocą odpowiednio dobranych więzów oraz stopy podpory. W tym przypadku zadane obciążenie działa na ramiona podpory znajdujące się pod kątem 135 stopni względem siebie (Rys. 2).

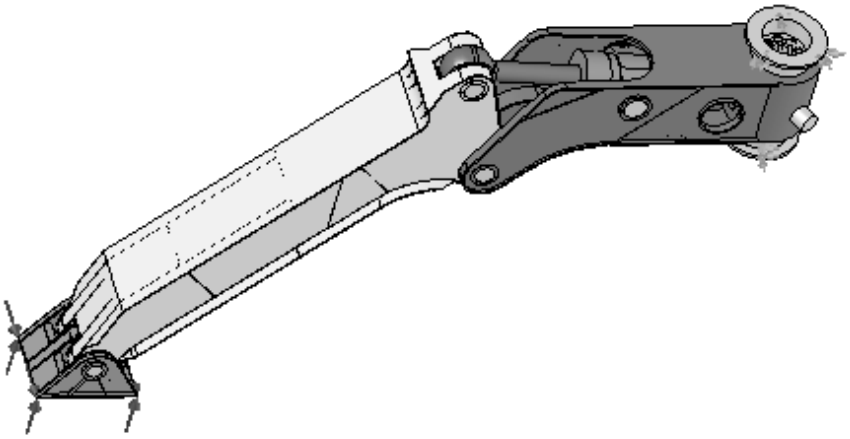
Istotnym zagadnieniem przy analizie wytrzymałościowej podpory mostu było spełnienie wymagań dotyczących jej wytrzymałości, co wstępnie zostało rozstrzygnięte po analizie wyników uzyskanych poprzez symulację komputerową. Symulację tę przeprowadzono dla obciążeń masowych występujących podczas rozkładania/składania przęseł mostu wraz z układaczem. W zasadzie jako kryterium do weryfikacji konstrukcji przyjęto przypadek graniczny, który może wystąpić podczas rozkładania przęseł mostu, czyli stan równowagi chwiejnej. Wówczas obciążenie podpory może stanowić całą masę zestawu mostowego, czyli ok. 50 t.

Ważnym aspektem obliczeń są przyjęte warunki brzegowe. Mają one olbrzymi wpływ na otrzymane wyniki. Z uwagi na różnorodność mogących wystąpić warunków terenowych przyjęto, że podpora może przemieścić się w poziomie, czyli tarcie między podłożem a stopą podpory jest mniejsze od siły bocznej. Parametr ten jako najmniej korzystny został przyjęty w obliczeniach. Ponadto założono 20-procentowy wzrost siły pionowej względem średniej arytmetycznej występujących sił na podporach z uwagi na możliwą niesymetryczność położenia środka masy całego zestawu. Analiza teoretyczna wskazuje, że przy odchyłce (a) o ok. 0,2 m położenia środka masy zestawu względem wzdłużnej osi pojazdu siła działającą na podporę wzrasta o 2 T, czyli osiąga 27T. W naszym układzie przeliczone wartości sił przy różnych wartościach odchyłek zawiera Tablica 1.

Tablica 1

a [m]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
F [T]	26	27	28	29	30	31

Uwzględniwszy nierównomierny rozkład masy całego mostu względem osi wzdłużnej pojazdu przyjęto, że jedna z podpór powinna przenieść 30T obciążenia. Całkowite obciążenie pojedynczej podpory przyjęto w następujący sposób: siła osiowa podpory o wartości 30T. Ponadto uwzględniono również wpływ siły bocznej o wartości 20% wielkości siły osiowej.



Rys. 2 Ilustracja warunków brzegowych oraz obciążenia

Z uwagi na różne możliwe parametry kąta, jaki tworzą ramię dolne i górne podpory (Rys. 3), a który bardzo silnie wpływa na wyniki obliczeń, dopuszczono pracę podpór dla maksymalnego rozwarcia ramion 135 stopnie. Dla takiego kąta rozwarcia ramion podpory przeprowadzone zostały wszystkie analizy (Rys. 4). Przykładowe wyniki obliczeń w analizowanej konstrukcji pod wpływem obciążeń zewnętrznych w pozycji pracy (układ na podporach) przedstawiono na (Rys. 3) - rozkład pola odkształceń oraz na (Rys. 4), (Rys. 5) i (Rys. 6) - rozkład pola naprężeń .

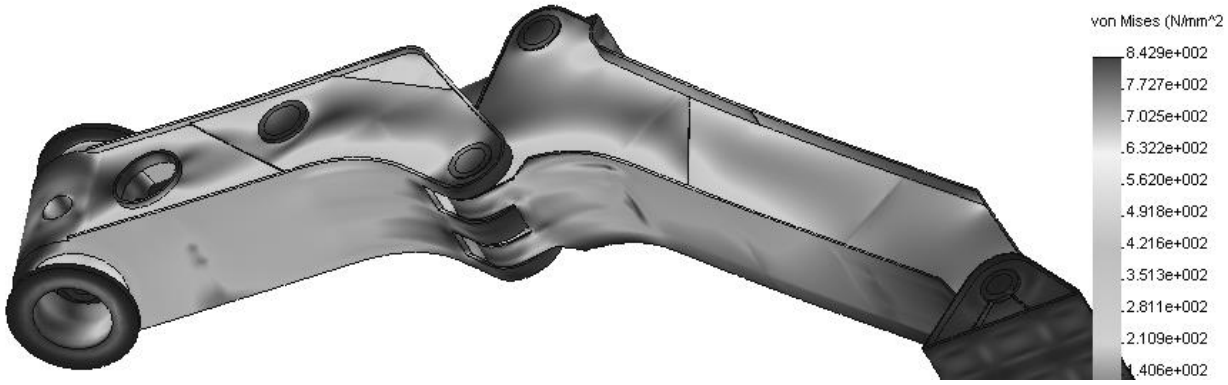
Rys. 3 Odkształcenia konstrukcji dla obciążenia w [m]. Deformacja w skali 7:1

Maksymalne odkształcenia osiągnęły wartość poniżej 3 mm. Natomiast naprężenia zobrazowane na rysunkach poniżej wskazują, że maksymalne wartości naprężeń wg Hubera-Misesa-Henky'ego nie przekroczyły 842 MPa i wystąpiły lokalnie.

Rys. 4. Rozkład pola naprężeń redukowanych w modelu podpory w [MPa]-widok z góry

W fazie projektowania wykonano obliczenia wytrzymałości konstrukcji podpory, której wyniki [6] pozwoliły na weryfikację konstrukcji podpory pod kątem przyjętych parametrów. Wyniki te były podstawą do wprowadzenie istotnych zmian w elementach konstrukcji. Przeanalizowane wyniki konstrukcji wykonanej ze stali Weldox 900 pozwoliły na pozytywną ocenę tej konstrukcji.

Rys. 5. Rozkład pola naprężeń dla podpory- fragment konstrukcji



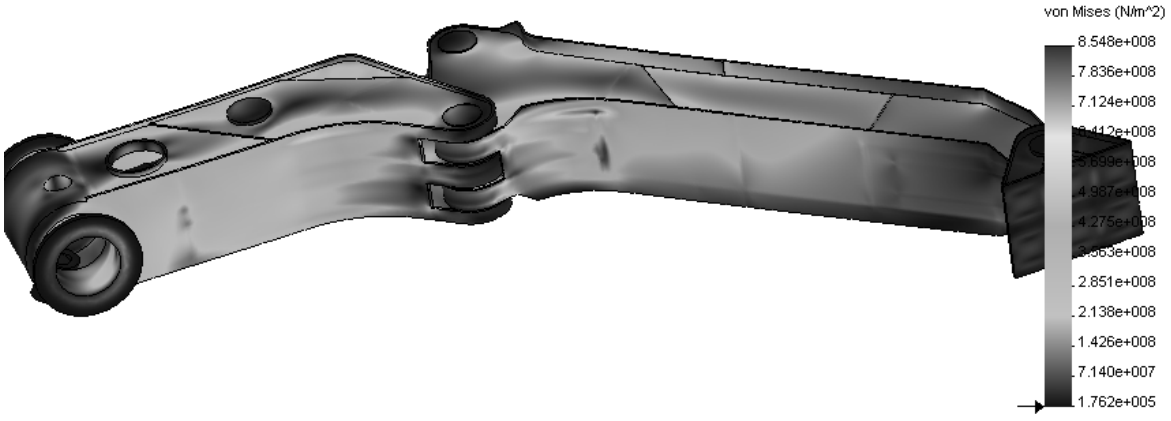
Rys. 6. Rozkład pola naprężeń redukowanych w modelu podpory w [MPa]-widok z dołu

2.3. Optymalizacja wytrzymałości konstrukcji podpory mostu

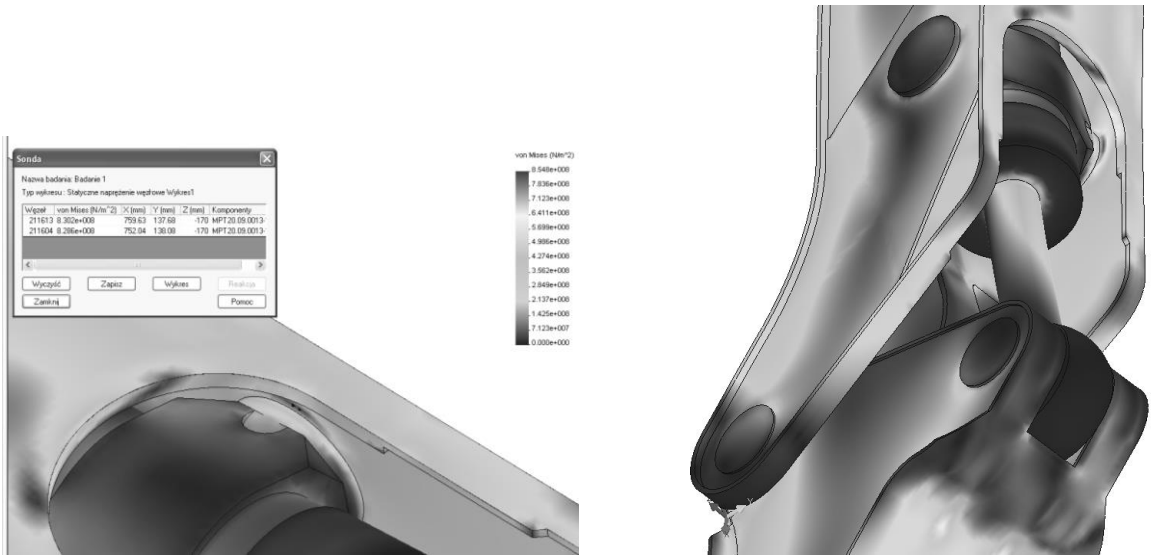
Kolejnym przykładem analizy jest weryfikacja tej samej konstrukcji podpory, ale w wersji do wykonania ze stali Domex700 [6]. Pozostałe parametry, tj. warunki brzegowe oraz obciążenia są takie same, jak w przypadku przedstawionym powyżej.
Symulację komputerową przeprowadzono również dla stanu równowagi chwiejnej, więc warunki brzegowe przyjęto analogicznie jak poprzednio.

Istotnym zagadnieniem przy analizie wytrzymałościowej podpory przy zmienionym materiale było rozstrzygnięcie czy podpora wykonana z innego materiału jest w stanie spełnić wymagania wytrzymałościowe pod wpływem zadanych obciążeń. Poniżej przedstawiono przykładowo rozkład pola naprężeń – mapkę naprężeń w widoku ogólnym całej konstrukcji (Rys. 7) oraz fragmentu podpory (Rys. 8), (

Rys. 9). Z porównania z poprzednim rozwiązaniem można wyciągnąć wniosek, że o ile podpora wykonana ze stali Weldox 900 była konstrukcją spełniającą wymagania wytrzymałościowe, to konstrukcja wykonana ze stali Domex 700 nie spełnia tych wymagań w pełnym zakresie przyjętych warunków pracy. Wykonanie podpory ze stali Weldox 900 zapewnia bezpieczeństwo jej funkcjonowania. Ostateczną weryfikację przedstawionych wyników obliczeń zweryfikowano poprzez wykonanie badań tensometrycznych. W konstrukcji poziom naprężeń redukowanych jest w przeważającym obszarze na poziomie do 630 MPa.



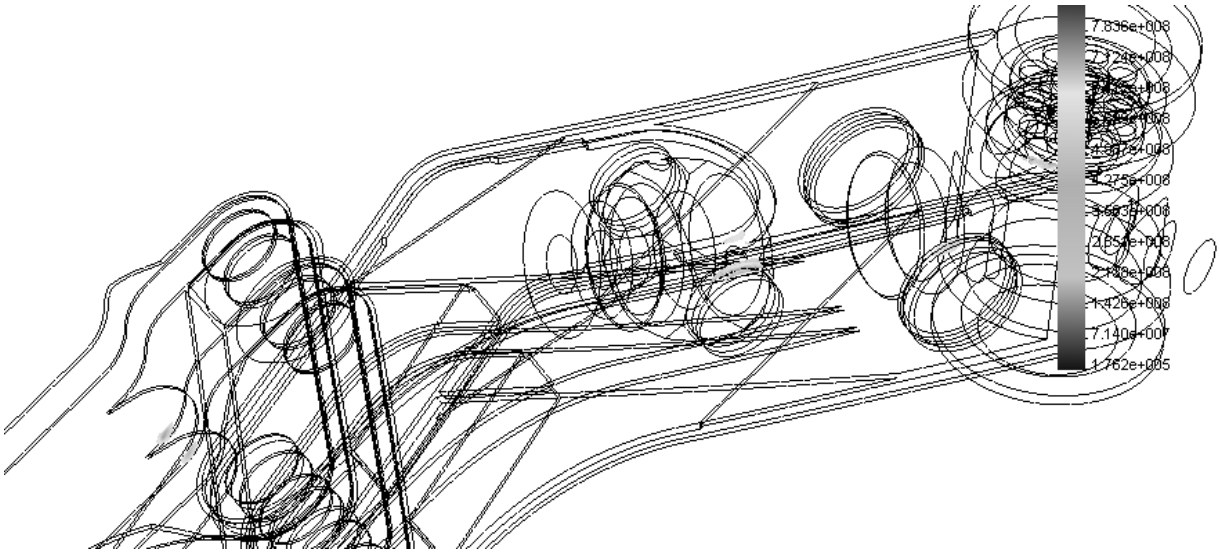
Rys. 7. Rozkład pola naprężeń wg H-M-H - widok z dołu na podporę



Rys. 8. Naprężenia redukowane występujące w okolicy mocowania siłownika w ramieniu górnym modelu podpory [MPa]

Oba rysunki (Rys. 8) oraz (

Rys. 9) przedstawiają to samo miejsce w konstrukcji w różnych ujęciach.



Rys. 9. Obszary w konstrukcji o wytężeniu powyżej 600 MPa

Jednakże konstrukcja podpory wykonana z materiału Domex 700 nie spełnia wymagania wytrzymałości konstrukcji w przypadku szczególnym, jednak możliwym do wystąpienia, gdyż granica plastyczności dla tego materiału wynosi 700 MPa. Lokalnie

maksymalne naprężenia redukowane wg H-M-H w konstrukcji osiągają 850 MPa, co oznacza, że są powyżej wartości naprężeń dopuszczalnych dla zastosowanej stali Domex700. W tej konstrukcji minimalny współczynnik bezpieczeństwa dla konstrukcji podpory jest na poziomie 0.8, co oznacza, że jest niewystarczający. Należy jednak uwzględnić fakt, że maksymalne naprężenia redukowane występują lokalnie oraz to, że obliczenia przeprowadzone są dla szczególnego przypadku obciążenia, gdy podpory mogą zostać obciążone całkowicie masą pojazdu. Oznacza, że wszystkie osie mogą się oderwać od podłoża, a w dodatku przy niesymetrycznym położeniu środka masy względem osi wzdłużnej pojazdu.

2.4. Weryfikacja wytrzymałości konstrukcji podpory do wersji odchudzonej

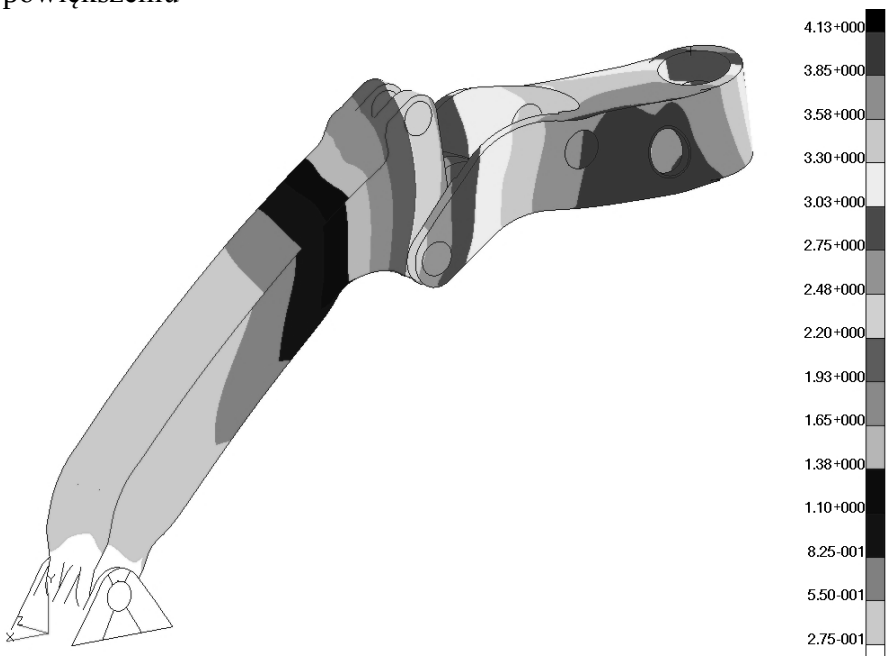
Przedstawiona powyżej podpora została wcześniej poddana weryfikacji oraz optymalizacji [4] przez zespół, którego wyniki wskazywały na możliwość odchudzenia konstrukcji podpory. Badanie zachowania się konstrukcji podpory zestawu mostowego w wersji odchudzonej, konstrukcji zaproponowanej przez zewnętrzny zespół obliczeniowy, było również przedmiotem naszej analizy. Przyjęte do obliczeń odmienne warunki brzegowe wpłynęły zasadniczo na uzyskane przez zespół wyniki analizy statycznej pod wpływem podobnych obciążeń. Analizowana konstrukcja podpory miała zasadniczo odmienny rozkład naprężeń. Ponadto maksymalne naprężenie redukowane w konstrukcji nie przekroczyło 390 MPa. Uzyskane różnice w wynikach pola naprężeń oraz pola przemieszczeń były znaczne.

Rys. 10. Rozkład naprężeń redukowanych w [MPa]

Rys. 10 oraz

Rys. 11 przedstawiają pełną gamę wyników dla analizowanej konstrukcji. W wyniku symulacji otrzymano również pole przemieszczeń pod wpływem obciążeń. Poniżej na

Rys. 11 przedstawiono rozkład pola przemieszczeń modelu. Maksymalne przemieszczenie wynosi 4,13 mm. Rysunek przedstawia deformację modelu pod wpływem obciążenia w powiększeniu



Rys. 11. Rozkład przemieszczeń wypadkowych na modelu odkształconym

W wyniku analizy konstrukcji otrzymano wyniki pozwalające na odchudzenie konstrukcji. Przykład ten pokazuje jak łatwo można uzyskać różne wyniki obliczeń niemal przy tych samych uwarunkowaniach. Poziom naprężeń uzyskano znacznie niższy niż w analizach przedstawionych w pkt. 2.2 i 2.3, a rozkład naprężeń jest zupełnie odmienny. Wskazuje to na fakt, że do obliczeń inżynierskich MES należy podchodzić z należytą rozwagą. Dodam, że dyskusje na temat przyjętego modelu oraz różnic w podejściu do tego problemu trwały kilka dni, bo przecież najważniejszym celem była w miarę realna weryfikacja zaprojektowanej konstrukcji i ustalenie przyczyn występujących różnic w wynikach obliczeń. Ostatecznej weryfikacji dokonano poprzez badania tensometryczne.

3. PODSUMOWANIE

Techniki komputerowe są nieodzownym elementem współczesnego procesu projektowania, zwłaszcza w zastosowaniu do prac badawczo-rozwojowych. Jak przedstawiono powyżej tylko wówczas są przydatne, jeśli stosowane są z rozwagą przez doświadczonych specjalistów. Przypadkowe wykorzystywanie takiego silnego narzędzia jakim jest MES może prowadzić do rozbieżnych wyników, a przecież najważniejsze jest by wiedza uzyskana na etapie badań była na tyle rzetelna, by można było ją wykorzystać do podejmowania wiążących decyzji. Podsumowując stwierdzono, że badana konstrukcja podpory spełnia wymagania wytrzymałościowe pod warunkiem, że jest wykonana ze stali Weldox900, a maksymalny kąt rozwarcia ramienia górnego i dolnego podpory w stanie obciążenia nie będzie przekraczał 135 stopni. Powyższy warunek został przyjęty na etapie obliczeń. W przypadku większego kąta rozwarcia wymagania dotyczące podpory są większe.

4. LITERATURA

[1] Cosmos/M, *Finite Element Analysis System Advanced Seminar.* Structural Research & Analysis Corporation, Santa Monica 1993, California.

[2] RUSIŃSKI E.: *Metoda elementów skończonych - system Cosmos/M*, WKŁ Warszawa 1994.

[3] ZIENKIEWICZ O.C., Taylor R.L.: *The Finite Element Method*, Fourth edition, 1991.

[4] BURCZYŃSKI, KOKOT : *Obliczenia wytrzymałościowe konstrukcji układu podporowego mostu MS-20*, (Sprawozdanie z pracy) Politechnika Śląska, Gliwice, XI.2005.

[5] ZIELIŃSKA A.: *Analiza wytrzymałości konstrukcji układu podporowego prototypu mostu MS-20*, (Prace własne niepublikowane) OBRUM Gliwice, IV.2006.

[6] ZIELIŃSKA A.: *Analiza wytrzymałości konstrukcji układu podporowego prototypu mostu MS-20*, (Prace własne niepublikowane) OBRUM Gliwice, VI.2006.

VIRTUAL TESTING OF SUPPORT MODEL IN BRIDGE SET

Abstract: This paper presents using Finite Elements Method (FEM) to investigation of support construction before its production. Virtual testing of model allows improve design process by using acquired knowledge on the stage of engineering calculation.

FEM method used in engineering calculation enables construction optimization by testing of model of preliminary designed construction. Using this method allows for design process optimization in our Centre.

Recenzent: dr inż. Andrzej SZAFRANIEC