

MSC SOFTWARE

SIMULATING REALITY

[www.mssoftware.com](http://www.mssoftware.com)

MSC2002150704

**IX SPOTKANIE UŻYTKOWNIKÓW  
OPROGRAMOWANIA MSC**

**Kazimierz Dolny 2004**

# WYKORZYSTANIE MSC.MARC DLA ANALIZY WSPÓŁPRACY KONTAKTOWEJ KOŁA I SZYNY

Aleksander Śładkowski  
Tomasz Kuminek

Politechnika Śląska (Katowice)

## 1. Wstęp

Modelowanie współpracy kontaktowej systemu koło szyna jest zadaniem bardzo trudnym ze względu na skomplikowany kształt profili tocznych kół i szyn. Istnieje kilka pakietów, które dają możliwość obliczania nieliniowych naprężeń kontaktowych takich jak MSC MARC, ANSYS i inne. W Katedrze Transportu szynowego Politechniki Śląskiej w Katowicach do obliczeń tego typu zagadnień kontaktowych wykorzystywany jest pakiet MSC MARC. Program ten wymaga jednak aby podczas budowy modelu zadać mu początkowe węzły (w stanie nie obciążonym), które są już w kontakcie co stanowi duży problem. Znalezienie tego punktu lub kilku punktów styku pomiędzy przekrojami poprzecznymi koła i szyny jest bardzo trudne ze względu na dosyć skomplikowaną geometrie tego układu o ile dla nowych (normowych) profili zadanie to można wykonać w programach typu CAD to dla zużytych jest to już duży problem.

Podstawową rzeczą w czasie modelowania kontaktu pomiędzy zużytymi profilami jest to, że trzeba posiadać taki profil w postaci dającej możliwość jego obróbki. Profile takie można otrzymać z przyrządów pomiarowych np. z profilomierzy produkowanych przez firmę P.T.U GRAW z Gliwic, które dają możliwość ciągłego odwzorowania profilu tocznego koła i szyny.

Zarys profilu z tych przyrządów pomiarowych otrzymuje się w formie kilkuset linii i znalezienie punktu a w niektórych przypadkach kilku punktów styku pomiędzy kołem a szyną jest bardzo trudne.

Kolejnym problemem już w samym modelowaniu w MES jest stworzenie odpowiedniej siatki tj. takiej, w której jak wykazano w artykule [1] węzły w jednym i drugim elemencie powinny być współbieżne (uzgodnione) tzn. że po obciążeniu węzły siatki MES koła i szyny powinny tworzyć pary, ponieważ niewspółbieżność (przesunięcie) węzłów spowoduje powstanie znacznego błędu obliczeń sięgającego nawet 30%.

Należy jeszcze wspomnieć o siatce, która w strefie kontaktu powinna być gęsta a w pozostałej części elementu może być już rzadsza, ponieważ od ilości elementów w modelu zależy czas obliczeń tzn. im więcej elementów tym dłuższy czas obliczeń. Dla przykładu można podać, że model współpracy kontaktowej w programie MSC MARC zbudowany z 5500 elementów jest liczony przez dobry komputer (procesor 2 GHz i 1 GB DDRAM) przez 3 godzin natomiast czas obliczeń dla modelu zbudowanego z 2500 elementów przy tych samych założeniach jak w poprzednim modelu sięga 10 min. Zatem należy zwrócić również uwagę na ilość elementów poza strefą kontaktu.

Następnym problemem w modelowaniu jest zadanie samych sił działających na układ. W przypadku jednego obciążenia jest to sprawa prosta modeluje się to ustawiając środek szyny w punkcie przypadającym na środek okręgu tocznego koła, natomiast w przypadku działania dwóch sił tj. pionowej i bocznej sprawa jest bardziej skomplikowana ponieważ w zależności od siły bocznej działającej na koło zmienia się położenie strefy kontaktu tak, że uwzględnienie tego zjawiska w programach typu CAD jest niemożliwe.

Kolejnym dosyć istotnym problemem jest dokładność otrzymanych z urządzeń pomiarowych profili. Profilomierz do kół A-B ma rozdzielczość 0,01 mm a profilomierz do rozjazdów XY posiada rozdzielczość 0,0375 mm a dokładność tych urządzeń jak podaje producent jest mniejsza niż 0,1mm. Oczywiście dla rozwiązania zagadnienia kontaktowego taka dokładność jest niewystarczająca, gdyż jak wiemy z teorii Hertza wielkość penetracji (wgłębienia) koła w szynę przy takich obciążeniach jakie występują na zestawie jest na poziomie 0,12 mm.

W artykule przedstawiono metodologię budowy modelu i obliczeń naprężeń kontaktowych w systemie koło szyna zarówno dla nowych (normowych) jak i zużytych profili kół i szyn.

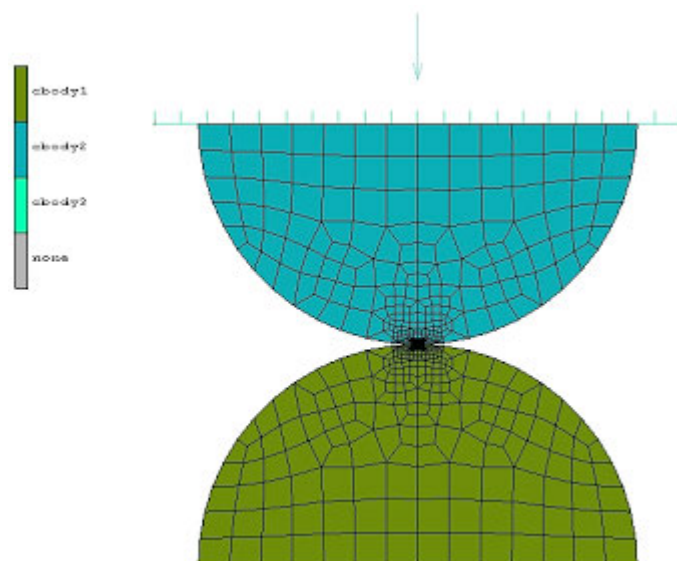
## 2. Model testowy

W modelowaniu przy użyciu metody elementów skończonych istotnym elementem jest odpowiednie dobranie gęstości siatki, ponieważ jej gęstość ma znaczący wpływ na dokładność obliczeń.

Oszacowanie błędu obliczeń numerycznych naprężeń kontaktowych dla nieskomplikowanych przypadków, takich jak np. dwa dociskane walce jest stosunkowo proste, gdyż można porównać wyniki otrzymane w MES z obliczeniami analitycznymi. Jednak gdy mamy do czynienia z bardzo skomplikowanym modelem, jakim jest np. kontakt koła z szyną, wyznaczenie błędu obliczeń numerycznych jest praktycznie niemożliwe.

W celu rozwiązania zagadnienia kontaktowego pomiędzy kołem a szyną w pierwszym etapie pracy zbudowano model testowy w postaci dwóch dociskanych walców, na przykładzie którego została dobrana gęstość siatki i wzajemne położenie węzłów w kontakcie.

Zadanie to zostało policzone metodą analityczną przy pomocy teorii Hertza oraz przy pomocy programu MSC.MARC. Badania numeryczne naprężeń kontaktowych wykonano dla czterech modeli walców o różnej liczbie par węzłów (od 5 do 9) w kontakcie po obciążeniu. Początkowo założono, że węzły w kontakcie pomiędzy górnym i dolnym walcem pokrywają się a następnie policzono te same modele dokonując modyfikacji siatki w dolnym walcu zwiększając ilość elementów tak, że węzły w kontakcie nie pokrywały się. Otrzymane wyniki analizy numerycznej porównano z rozwiązaniem analitycznym.



Rys. 1 Model testowy

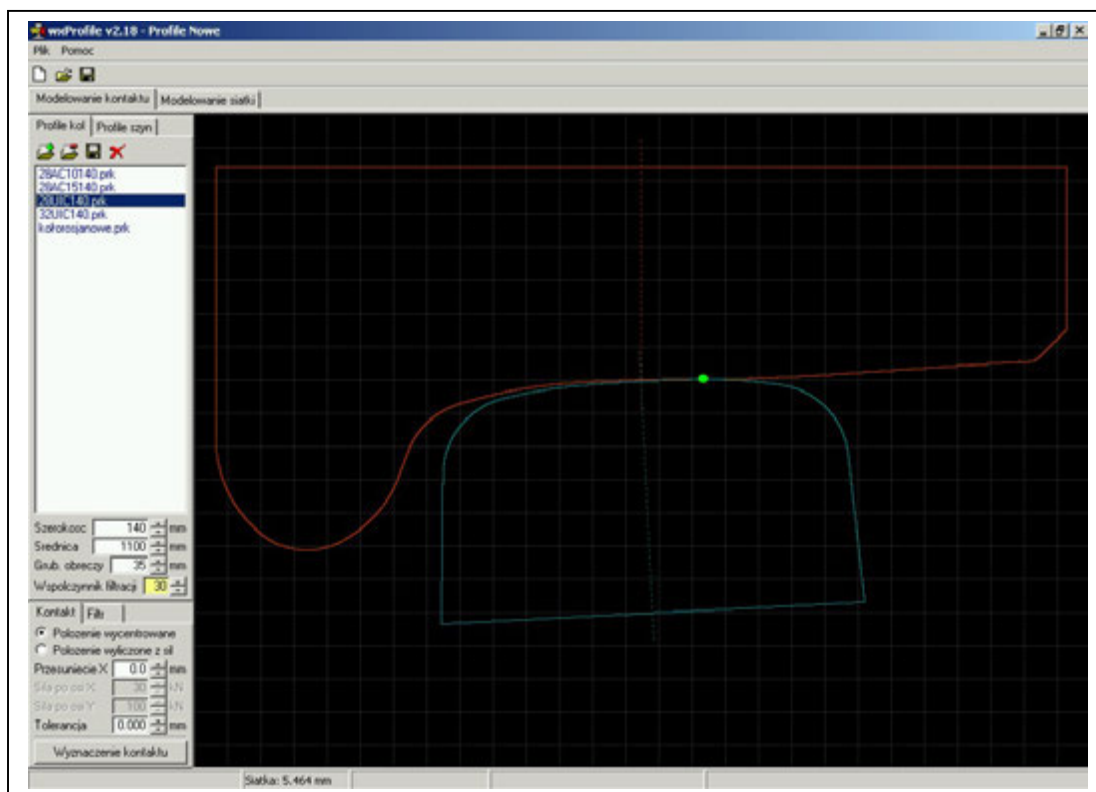
Z przeprowadzonego eksperymentu wywnioskowano, że błąd obliczeń zmniejsza się ze wzrostem liczby elementów w strefie kontaktu. Błąd obliczeń naprężeń kontaktowych dla MES w porównaniu do obliczeń analitycznych wyniósł dla badanych modeli przy siatkach zgodnych 5,13% dla modelu z pięcioma parami węzłów w kontakcie po obciążeniu oraz 3,57% dla modelu z siedmioma parami węzłów w kontakcie po obciążeniu, natomiast dla siatek przesuniętych błąd ten wynosił odpowiednio 15,414% i 26,543%.

Należy jeszcze zwrócić uwagę na fakt, że rozkład naprężeń dla górnego i dolnego walca przy siatkach niezgodnionych nie jest jednakowy. W przypadku badanych modeli maksymalne naprężenia nie występują w środku strefy kontaktu, tak jak to wynika z teorii Hertza. Dlatego w ocenie stanu naprężeń nie można rozpatrywać wyłącznie naprężeń maksymalnych lecz trzeba również zwrócić uwagę na rozkład tych naprężeń. Wyniki tego eksperymentu pozwoliły na opracowanie metodyki doboru siatki MES przy modelowania kontaktu pomiędzy kołem a szyną oraz oszacowanie błędu obliczeń numerycznych.

### 3. Analiza numeryczna

W wyniku opisanych we wstępie problemów i niedogodności związanych z budową modelu systemu koło-szyna, powstał autorski program „wxProfile”, który rozwiązuje opisane powyżej problemy. Program ten służy do tworzenia modelu na etapie płaskiego przekroju poprzecznego koła i szyny. Stworzony program wxProfile rozwiązuje te problemy i to nie tylko dla kół nowych (normowych) ale również dla zużytych profili kół i szyn. Krótki opis możliwości programu przedstawiono poniżej.

Program ten został napisany w języku C++ i działa pod systemem operacyjnym Windows. Program składa się z okna graficznego na którym wyświetlane są wyniki oraz paska narzędzi w którym zadajemy parametry badanego przekroju (rys. 2).



Rys. 2 Okno dialogowe programu wxProfile v. 2.18.

Podstawowym zadaniem programu jest przygotowanie przekrojów koła i szyny do analizy numerycznej w programie MSC.MARC dlatego posiada on kilka ważnych funkcji, które skracają czas modelowania.

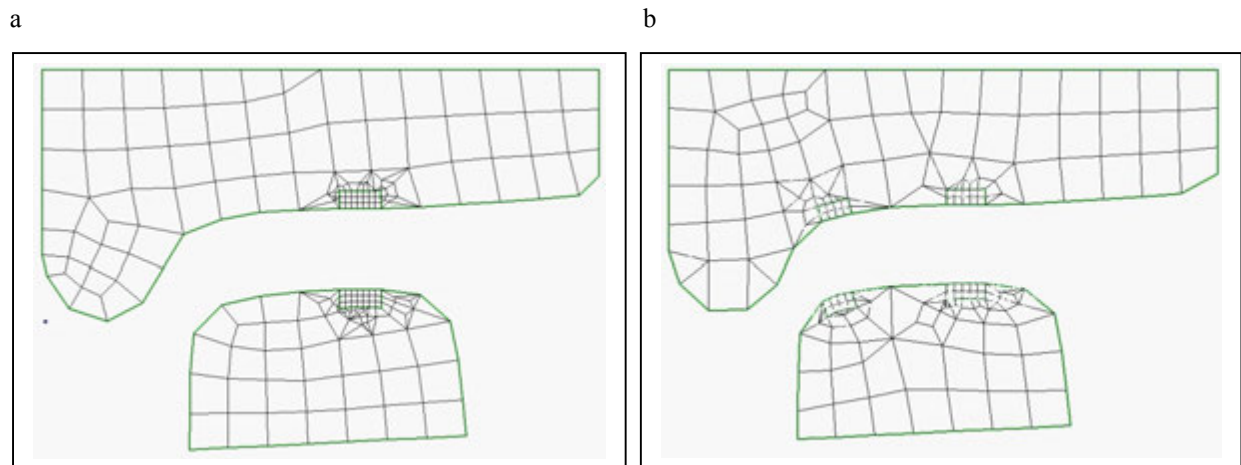
Program daje nam możliwość:

- obróbki profili kół i szyn poprzez wygładzanie ich nierówności (dotyczy profili zużytych);
- wyznaczenia początkowego punktu kontaktu pomiędzy przekrojami z dokładnością do 0,001mm;
- wyznaczenia położenia koła względem szyny w zależności od działania sił (pionowych i bocznych);
- ustalenia dowolnego położenia koła względem szyny (funkcja offset);
- przygotowuje przekroje do dowolnego modelowania siatki ES poprzez tworzenie strefy siatki zagęszczonej w strefie kontaktu;
- wizualizację wyników w oknie graficznym;
- eksport otrzymanych wyników do programu MSC.VisualNASTRAN for Windows w postaci pliku \*.neu. Profile koła i szyny w tym pliku są zapisane w postaci linii.

### Budowa modelu 3d w programie MSC.VisualNASTRAN for Windows

Do stworzenia modelu przestrzennego wykorzystywany jest program MSC.Visual NASTRAN for Windows ponieważ stworzenie tego modelu w MSC.MARC jest sprawą bardzo trudną.

Na początku w programie MSC.VisualNASTRAN for Windows importujemy zapisaną w programie wxProfile geometrię przekroju poprzecznego naszego modelu. Nie musimy już tworzyć powierzchni ponieważ są one już zapisane w naszym pliku \*.neu. Następnie trzeba zamieszczać przekrój poprzez polecenie *mesh – geometry – surface*. Nie musimy podawać ilości elementów na linii ponieważ zakładamy, że na każdej linii jest jeden element, tak zamieszczone obiekty są *plot only* rys. 3.



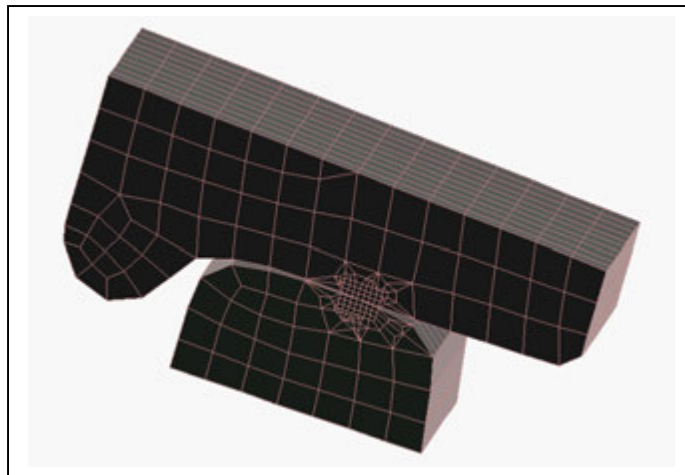
Rys. 3. Siatka ES w programie Visual NASTRAN for Windows

- dla kontaktu jednostrefowego
- dla kontaktu dwustrefowego

Należy jeszcze pamiętać o usunięciu podwójnych węzłów jakie powstają na krawędzi styku dwóch powierzchni jednego elementu (koła bądź szyny) tj. pomiędzy miejscem zagęszczenia siatki a pozostałą częścią elementu. Następnie zadajemy materiał – stal o module Younga  $2e^{11}$

[Pa] i stałej Poissona 0.3 oraz właściwości elementów *property* gdzie wybieramy elementy typu *solid* i nadajemy mu zadany wcześniej materiał. Teraz musimy wyciągnąć elementy osobno dla szyny i dla koła.

Wyciągnięcie siatki (elementów) dla szyny należy wykonać przez *mesh – extrude – element* następnie zaznaczamy elementy szyny i podajemy ilość elementów na długości wyciągnięcia oraz właściwości elementów *property* a następnie podajemy kierunek i długość wyciągnięcia najlepiej 0.015 m po osi z. Operację tą musimy jeszcze powtórzyć aby wyciągnąć szynę w przeciwnym kierunku czyli o -0.015 m po osi z. Wyciągnięcie elementów koła dokonujemy podobnie tylko poprzez funkcję *mesh – revolve – element* tylko tutaj parametrem jest kąt obrotu 1.56° oraz oś obrotu. Należy pamiętać, że kąt obrotu ściśle zależy od wyciągnięcia szyny, ponieważ chodzi o to aby węzły zgadzały się również w płaszczyźnie xz. Jeżeli już wyciągnęliśmy elementy należy je podzielić na dwie grupy jedną dla szyny drugą dla koła jest to bardzo przydatne przy późniejszym modelowaniu. Należy to wykonać poprzez *group - set* gdzie należy podać nazwę tworzonej grupy a następnie *group – element – ID* i zaznaczyć odpowiednie elementy. Następnie trzeba dosunąć elementy szyny do koła ponieważ program WXPFILE przy kopiowaniu współrzędnych automatycznie odsuwa szynę od koła o stałą wartość 0.02m po osi y. Należy to wykonać przez opcję *modify – move by – element*.



Rys. 4. Model 3d koła i szyny zbudowany w programie Visual NASTRAN for Windows

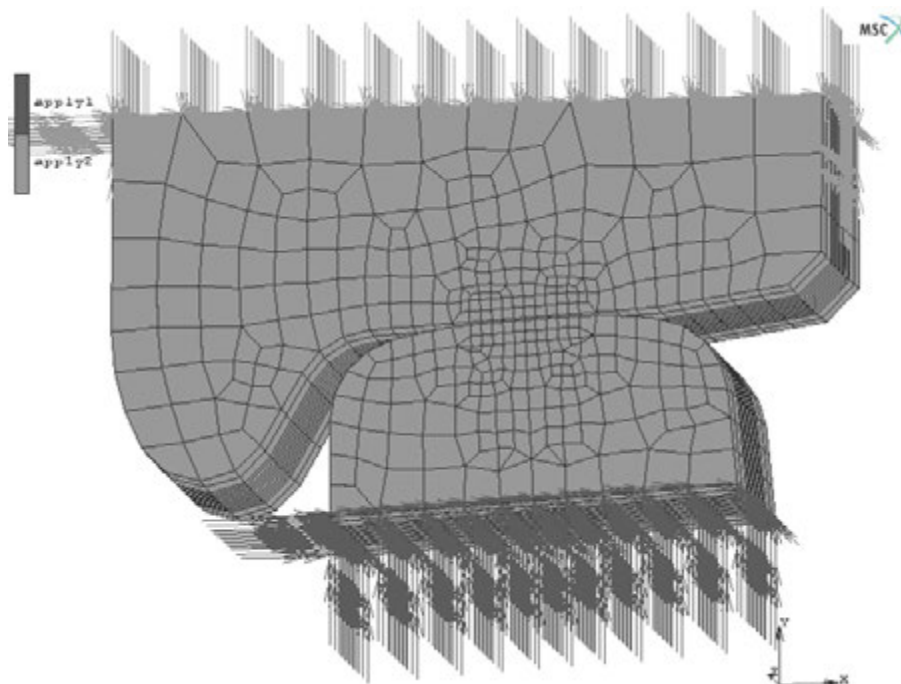
Tak przygotowany model należy zapisać a następnie wyeksportować do programu MSC MARC poprzez *file – export – analysis model* następnie zaznaczyć MARC i podać nazwę pliku pod jaką ma być zapisany model a w następnym oknie zaznaczamy MARC 2000 i naciskamy OK. w następnym oknie odznaczamy *constraint* i klikamy OK.

### **Zadawanie warunków brzegowych w MSC.MARC**

W programie MSC.VisualNASTRAN for Windows tworzymy tylko model przestrzenny a następnie wczytujemy go do programu MSC.MARC gdzie zadajemy warunki brzegowe tj. obciążenia, podparcia oraz zagadnienia związane z kontaktem a następnie wykonujemy obliczenia.

W celu zadania warunków brzegowych trzeba na górnej powierzchni koła narysować nieodkształcalną płaszczyznę. W tym celu należy obrócić wczytany model o 90° wokół osi y a następnie narysować dwie linie i stworzyć z nich płaszczyznę rys. 5.





Rys. 5. Model zbudowany w programie MSC.MARC

Następnie zadajemy podparcia poprzez utwierdzenie dolnej części szyny we wszystkich kierunkach tak ja widać na powyższym rysunku.

Kolejną rzeczą jest zadanie obciążenia co można zrobić w dwojaki sposób albo poprzez zadanie sił skupionych do węzła kontrolnego albo poprzez przemieszczenie stworzonej wcześniej płaszczyzny. Obciążenia w miarę możliwości powinny się zadawać jako przemieszczenia ze względu na krótszy czas obliczeń w porównaniu do obciążeń zadanych przez siły skupione.

Po zadaniu już podparć i obciążeń trzeba zadać elementy kontaktowe robimy to przez funkcję *contact* gdzie zaznaczamy ciała odkształcalne *deformable* tj. osobno koło i szyna oraz ciało nieodkształcalne *rigid*, którym jest płaszczyzna. Przy zaznaczaniu elementów pomocny jest fakt stworzenia w Visual NASTRAN for Windows grup elementów co w MSC MARC daje możliwość wyłączenia stworzonych grup elementów.

Po zadaniu ciał kontaktowych trzeba jeszcze obrócić płaszczyznę nieodkształcalną tak aby jej strona wierzchnia była od strony koła należy to wykonać poprzez funkcję *flip surfaces*.

Następnie tworzymy tabelę kontaktu *contact table* gdzie określamy rodzaj kontaktu pomiędzy ciałami tj. pomiędzy kołem a szyną *touching* pomiędzy kołem a płaszczyzną *glue* a pomiędzy szyną a płaszczyzną *no contact*. Dla tak przygotowanego modelu po określeniu kilku opcji można uruchomić obliczenia.

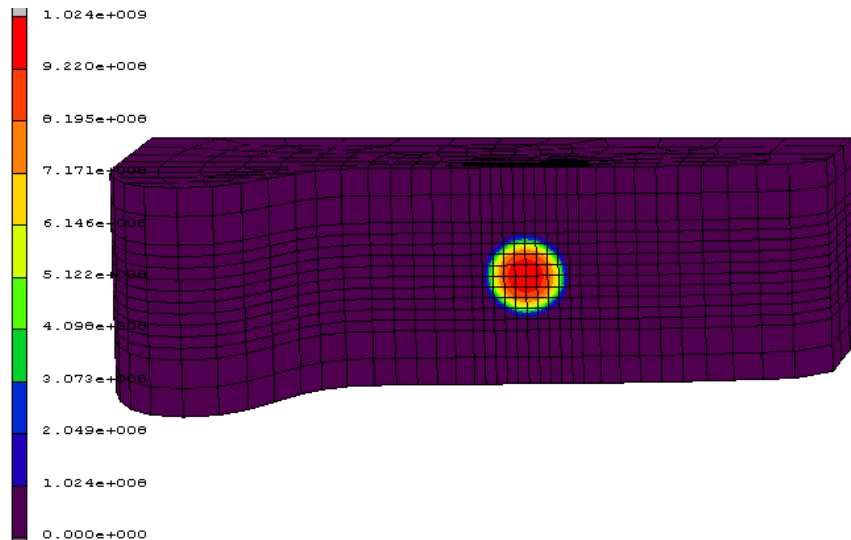
#### 4. Przykładowe wyniki obliczeń

Analizę numeryczną przeprowadzono w programie MSC.MARC według przedstawionej powyżej metodyki.

Obliczenia przeprowadzono dla lokomotywy elektrycznej typu EU07 o średnicy koła nowego 1250 mm. Przyjęto obciążenia działające na koło dla siły pionowej 100[kN], które wynika z masy lokomotywy natomiast obciążenie boczne przyjęto 30[kN].

Przy czym założono dla koła nowego profil 28UIC140 a dla zużytego ten sam profil po przejechaniu przez lokomotywę ok. 100 tys km oraz przyjęto nową szynę typu UIC60 z pochyleniem 1:40.

Dla uproszczenia modelu przyjęto do obliczeń tylko fragment obręczy koła i samą główkę szyny. Wyniki analizy przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Przykładowy rozkład naprężeń kontaktowych w programie MSC.MARC

## 5. Wnioski końcowe

Opracowany i wykonany program wxProfile znacznie ułatwia modelowanie zjawiska kontaktowego oraz wykonuje to z dużą precyzją. Dodatkowo program ten daje nam możliwość obserwowania i modelowania oczywiście z pewnym przybliżeniem położenia strefy bądź stref kontaktu w zależności od siły bocznej działającej na zestaw. Program ten umożliwia optymalizację modelu pod względem ilości i wielkości elementów skończonych co pozwala zdecydowanie skrócić czas obliczeń.

Opracowana metodologia obliczeń pozwoliła na kompleksowe rozwiązanie zadania współpracy kontaktowej pomiędzy kołem i szyną zarówno dla nowych jak i zużytych profili kół i szyn.

Kolejnym etapem działań będzie poszerzenie programu wxProfile o możliwość modelowania kąta nabiegania koła na szynę. Program będzie wyznaczał położenia punktów kontaktu we wszystkich trzech kierunkach oraz budował na tej podstawie poprawną siatkę elementów skończonych.

Badania prowadzono w ramach Projektu Badawczego KBN nr 5T12C 052 23.