

KUŁAKOWSKA Agnieszka<sup>1</sup>

### KOMPUTEROWE MODELOWANIE 3D PROCESU NAGNIATANIA NAPOROWEGO TOCZNEGO CZĘŚCI SAMOCHODOWYCH

*Praca dotyczy modelowania komputerowego i symulacji procesu nagiatania naporowego tocznego powierzchni części maszyn. Opracowano w tym celu aplikacje 3D w programie Ansys/Ls-Dyna do symulacji zjawisk fizycznych zachodzących podczas nagiatania powierzchni chropowatych w dowolnej chwili czasowej. Opracowano model fizyczny, matematyczny i komputerowy procesu. Przedstawiono wyniki rozkładu odkształceń i naprężeń oraz głębokości zalegania naprężeń.*

### 3D COMPUTER MODELING OF BURNISHING ROLLING PROCESS OF CAR PARTS

*The work is about computer modeling and simulation of the burnishing rolling process of the machine parts. In this aim a 3D application in Ansys/Ls-Dyna program to simulation physical phenomena occurring during burnishing rolling of the rough surface in any time was developed. The physical, mathematical and computer models were elaborated. The results of strain, stress distribution and the depth of the stress residual are presented.*

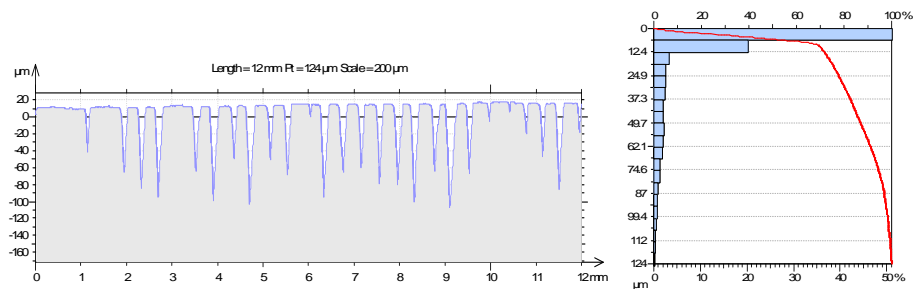
#### 1. WSTĘP

W dzisiejszych czasach technika motoryzacyjna rozwinięta jest na bardzo wysokim poziomie. Wielkie koncerny prześcigają się nawzajem, wprowadzając coraz to nowsze, lepsze i innowacyjne projekty. Powstaje coraz więcej firm oferujących podwyższenie mocy silników, poprawianie właściwości trakcyjnych, eksploatacyjnych i innych. Należy pamiętać, że jakość wytwarzanych wyrobów i koszt ich produkcji są zaliczane do najważniejszych problemów współczesnej techniki wytwarzania. Stawiane są coraz to większe wymagania eksploatacyjne względem współczesnych części maszyn. Na niezawodność, wytrzymałość i trwałość części decydujący wpływ mają właściwości warstwy wierzchniej, które osiąga się w zależności od rodzaju i przebiegu obróbki wykańczającej. Również różnorodność przeznaczenia i warunki pracy powodują potrzebę szukania takich sposobów obróbki, które pozwalają na kształtowanie różnej a zarazem optymalnej ze względu na przyjęte kryteria, jakości wyrobu.

Jedną z takich metod jest obróbka nagiataniem, która polega na miejscowym powierzchniowym odkształceniu plastycznym na zimno za pomocą twardego i gładkiego

<sup>1</sup>Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-620 Koszalin; ul. Raclawicka 15-17.  
Tel: + 48 94 347-82-01, E-mail: agnieszka.kulakowska@tu.koszalin.pl

elementu w kształcie kulki, krążka, rolki lub koła zębatego. Ma ona miejsce wtedy, gdy zgniot jest ograniczony do warstwy wierzchniej przedmiotu. Nagniatanie powoduje zmniejszenie chropowatości powierzchni oraz utwardzenie warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu [1]. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy profil powierzchni po nagniataniu i udział nośny liniowy powierzchni.



Rys. 1. Przykładowy profil chropowatości powierzchni po nagniataniu i udział nośny liniowy

Badania eksperymentalne procesu nagniatania naporowego tocznego są kosztowne i czasochłonne, dlatego też sięga się po nowoczesne, komputerowe metody rozwiązywania problemów z wykorzystaniem metod elementów skończonych.

Metoda elementów skończonych [2, 3] stosowana jest do rozwiązywania różnych problemów inżynierskich, głównie w przypadkach, gdy rozwiązanie metodą analityczną nie jest możliwe, czyli gdy geometria konstrukcji jest skomplikowana, zrobiona z różnych materiałów, obciążenia są złożone, a warunki brzegowe różnorodne. MES związana jest z podziałem skomplikowanych konstrukcji na małe odpowiednie elementy o skończonych wymiarach i określonej ich liczbie. W celu przeprowadzenia analizy MES zachodzi konieczność stworzenia modelu dyskretnego analizowanej konstrukcji.

W pracy zajęto się analizą procesu nagniatania naporowego tocznego z wykorzystaniem systemu Ansys/Ls-Dyna. Opracowane algorytmy i aplikacje komputerowe w systemie tym powodują, że proces projektowania technologii nagniatania naporowego może być istotnie rozszerzony i ulepszony przez wykorzystanie możliwości, jakie stwarza wprowadzenie metod numerycznych do obliczeń przemieszczeń, odkształceń, naprężeń w przedmiocie obrabianym. Możliwa jest analiza czasowa procesu nagniatania oraz określanie pól naprężeń i odkształceń w warstwie wierzchniej, z uwzględnieniem chropowatości powierzchni po obróbce poprzedzającej, a zatem i prognozowanie ich wpływu na jakość technologiczną wyrobu. Zwiększa to możliwości ingerencji inżyniera w przebieg procesu projektowania technologii nagniatania oraz właściwy dobór parametrów i warunków do obróbki.

## 2. METODA ROZWIĄZANIA PROBLEMU

Równanie opisujące ruch i deformację obiektu na typowym kroku przyrostowym  $t \rightarrow \tau = t + \Delta t$  w uaktualnionym opisie Lagrange'a ma postać:

$$[{}^t\mathbf{M}]\{{}^t\Delta\ddot{\mathbf{r}}\} + [{}^t\mathbf{C}_T(\cdot)]\{{}^t\Delta\dot{\mathbf{r}}\} + ([{}^t\mathbf{K}_T(\cdot)] + [{}^t\Delta\mathbf{K}_T(\cdot)])\{{}^t\Delta\mathbf{r}\} = \{{}^t\Delta\mathbf{R}_T(\cdot)\} + \{{}^t\Delta\mathbf{F}(\cdot)\} + \{{}^t\mathbf{F}_T(\cdot)\}, \quad (1)$$

gdzie:

$[{}^t\mathbf{M}]$  - globalna macierz mas układu w chwili  $t$ ,

$[{}^t\mathbf{C}_T]$  - globalna macierz tłumienia układu w chwili  $t$ ,

$[{}^t\mathbf{K}_T]$  - globalna macierz sztywności układu w chwili  $t$ ,

$[{}^t\Delta\mathbf{K}_T]$  - globalna macierz przyrostu sztywności obiektu,

$\{{}^t\mathbf{F}_T\}$  - globalny wektor obciążenia obiektu w chwili  $t$ ,

$\{{}^t\Delta\mathbf{F}\}$  - wektor przyrostu obciążeń wewnętrznych obiektu na kroku  $t \rightarrow \tau = t + \Delta t$ ,

$\{{}^t\Delta\mathbf{R}_T\}$  - globalny wektor przyrostu obciążeń zewnętrznych obiektu na kroku  $t \rightarrow \tau = t + \Delta t$ ,

$\{{}^t\Delta\mathbf{r}\}$  - wektor przyrostu przemieszczeń węzłów obiektu na kroku  $t \rightarrow \tau = t + \Delta t$ ,

$\{{}^t\Delta\dot{\mathbf{r}}\}$  - wektor przyrostu prędkości węzłów obiektu na kroku  $t \rightarrow \tau = t + \Delta t$ ,

$\{{}^t\Delta\ddot{\mathbf{r}}\}$  - wektor przyrostu przyspieszeń węzłów obiektu na kroku  $t \rightarrow \tau = t + \Delta t$ .

W układzie równań (1) występuje  $3N$  niewiadomych tj. składowych wektorów: przyrostu przemieszczeń węzłów  $\{{}^t\Delta\mathbf{r}\}$ , przyrostu prędkości węzłów  $\{{}^t\Delta\dot{\mathbf{r}}\}$ , przyrostu przyspieszeń węzłów  $\{{}^t\Delta\ddot{\mathbf{r}}\}$ . Również część składowych wektora przyrostu obciążeń zewnętrznych (tj. dotyczących obszarów kontaktu ciał) jest nieznaną. Analityczne rozwiązanie tego równania jest niemożliwe ze względu na nadmiar niewiadomych. Możliwe jest jedynie rozwiązanie przybliżone poprzez zmniejszenie liczby występujących w nim zmiennych. W celu rozwiązania problemu posłużono się metodą całkowania jawnego zwaną również metodą różnic centralnych bądź metodą explicit. W metodzie różnic centralnych zakłada się schodkową aproksymację obliczanej funkcji, pochodne zaś oblicza się przez uśrednianie według wartości współrzędnych dla trzech sąsiednich punktów czasu  $t-\Delta t$ ,  $t$  oraz  $t+\Delta t$ .

W metodzie explicit przyjmuje się różnicową aproksymację pochodnych cząstkowych przemieszczeń zgodnie z równaniami (1):

$$\{{}^t\dot{\mathbf{r}}\} = \frac{1}{2\Delta t} (\{{}^{t+\Delta t}\mathbf{r}\} - \{{}^{t-\Delta t}\mathbf{r}\}), \quad (2)$$

$$\{{}^t\ddot{\mathbf{r}}\} = \frac{1}{\Delta t^2} (\{{}^{t+\Delta t}\mathbf{r}\} - 2\{{}^t\mathbf{r}\} + \{{}^{t-\Delta t}\mathbf{r}\}), \quad (3)$$

gdzie  $\Delta t$  jest przyrostem czasu.

Zakładając, że przyrost kroku czasowego  $\Delta t$  jest odpowiednio mały można dokonać częściowej linearyzacji przyrostowego równania nieliniowego (1), polegającej na pominięciu przyrostu macierzy sztywności układu  $[{}^t\Delta\mathbf{K}_T]$  i przyrostu wektora obciążeń wewnętrznych  $\{{}^t\Delta\mathbf{F}(\cdot)\}$ . Otrzymane równanie jest dalej nieliniowe względem wektora przyrostu przemieszczeń punktów węzłowych  $\{{}^t\Delta\mathbf{r}\}$  i jego pochodnych czasowych  $\{{}^t\Delta\dot{\mathbf{r}}\}$ ,  $\{{}^t\Delta\ddot{\mathbf{r}}\}$  [2].

Wówczas przy powyższych uproszczeniach równanie (1) dla typowej chwili czasowej  $t$  przy wykorzystaniu zasady dekompozycji przyrostowej można zapisać w postaci:

$$[\mathbf{M}]\{{}^t_{t-\Delta t}\ddot{\mathbf{r}}\} + [\mathbf{C}_T]\{{}^t_{t-\Delta t}\dot{\mathbf{r}}\} + [{}^{t-\Delta t}\mathbf{K}_T]\{{}^t_{t-\Delta t}\Delta\mathbf{r}\} = \{{}^t_{t-\Delta t}\mathbf{R}\} + \{{}^{t-\Delta t}\mathbf{F}_T\}. \quad (4)$$

Równanie (4) można rozwiązać dwoma sposobami. Sposób pierwszy polega na dalszym uproszczeniu postaci tego równania poprzez eliminację wyrażenia  $[{}^{t-\Delta t}\mathbf{K}_T]\{{}^t_{t-\Delta t}\Delta\mathbf{r}\} - \{{}^{t-\Delta t}\mathbf{F}_T\}$  natomiast w sposobie drugim dokonuje się dalszej dekompozycji wektora przyrostu przemieszczeń  $\{{}^t_{t-\Delta t}\Delta\mathbf{r}\}$  i przekształcenia równania (4). W efekcie otrzymuje się równanie końcowe:

$$[\tilde{\mathbf{M}}]\{{}^{t+\Delta t}\mathbf{r}\} = \{{}^t\tilde{\mathbf{Q}}\} \quad (5)$$

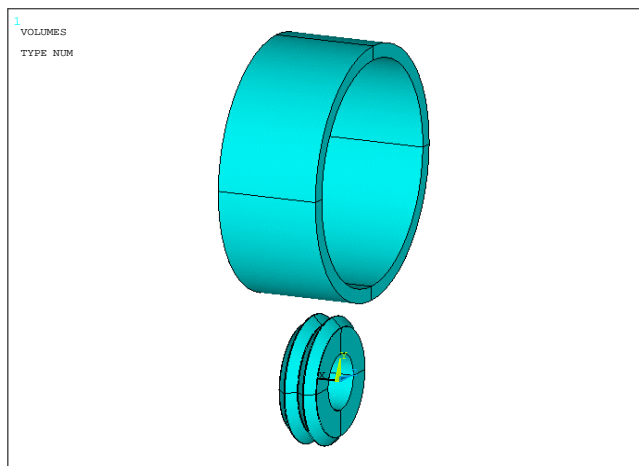
gdzie:

$[\tilde{\mathbf{M}}]$  - efektywna macierz mas

$\{{}^t\tilde{\mathbf{Q}}\}$  - efektywny wektor obciążeń.

### 3. ANALIZA NUMERYCZNA

W pracy przeprowadzono badanie procesu nagniatania naporowego tocznego powierzchni chropowatych. Przeprowadzono symulacje nagniatania regularnych, trójkątnych nierówności powierzchni twardym i gładkim narzędziem. W tym celu opracowano model geometryczny (rys. 2) a następnie aplikację 3D w programie ANSYS/LS-Dyna.



Rys. 2. Model geometryczny

System Ansys jest stosowany m. in. w przemyśle samochodowym, elektronicznym, naftowym, stalowym, atomowym a także w astronautyce, energetyce, technologii maszyn i

różnego rodzaju pracach konstrukcyjnych. Opracowana aplikacja umożliwia kompleksową analizę czasową stanów deformacji (przemieszczeń, odkształceń) i naprężeń, występujących w obiekcie składającym się z przedmiotu i narzędzia nagniatającego.

Możliwa jest pełna analiza dla następujących danych:

- dowolna geometria przedmiotu (np. wałek, tuleja, płaszczyzna, stożek) i narzędzia, a także ich zmienności w trakcie realizacji procesu,
- dowolnego materiału przedmiotu oraz materiału narzędzia (dowolny moduł Younga, nieliniowa zależność właściwości plastycznych materiału od: intensywności odkształceń, intensywności prędkości odkształceń i różne modele umocnienia itp.),
- dowolnej struktury geometrycznej powierzchni po obróbkach poprzedzających, można wprowadzać dowolne wartości promieni zaokrąglenia nierówności i dna między nierównościami (oraz ich położenia),
- dowolne odchyłki wysokości i odstepu nierówności o zarysie trójkątnym,
- różnych warunków tarcia w obszarze kontaktu, dowolne wartości współczynnika tarcia,
- dowolnego przemieszczenia poziomego i pionowego narzędzia w czasie.

Obliczenia w systemie ANSYS realizowano według następującego algorytmu:

a) przygotowanie danych (PREPROCESOR):

- określenie struktury geometrycznej warstwy wierzchniej po obróbce poprzedzającej oraz geometrii przedmiotu i geometrii narzędzia,
- zdefiniowanie właściwości materiału obrabianego i narzędzia nagniatającego,
- generowanie siatki elementów skończonych,

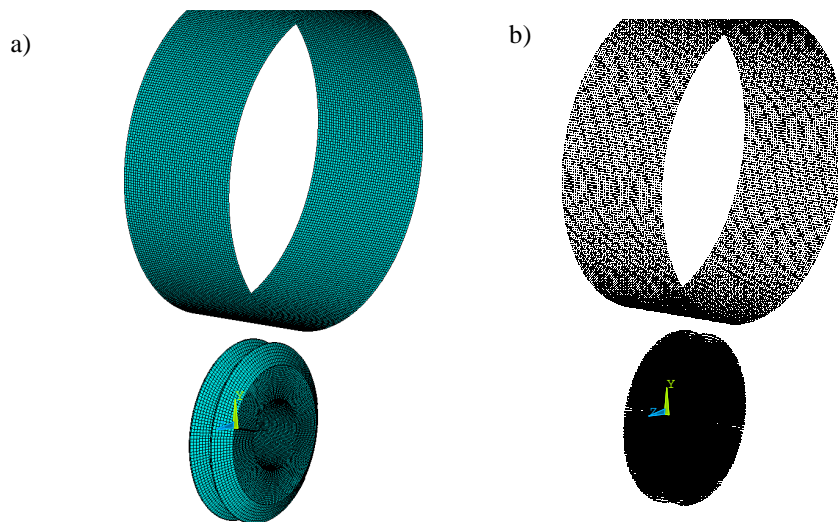
b) obliczenia (SOLVER):

- wprowadzenie kontaktowych elementów skończonych: TARGE i CONTA,
- wprowadzenie liczby kroków i iteracji, warunków zbieżności, itp.,
- wprowadzenia obciążeń,
- ustawienia przebiegu obliczeń,
- wykonanie obliczeń.

edycja wyników (POSTPROCESOR).

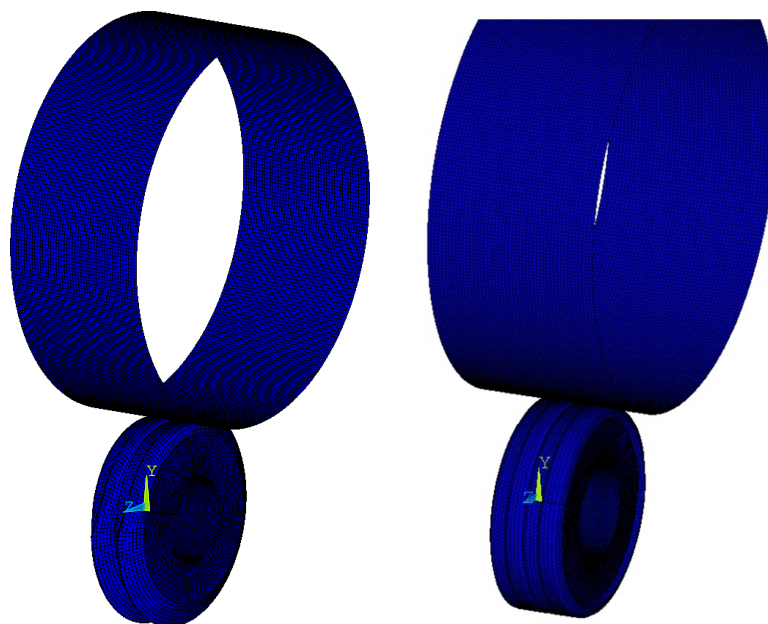
#### 4. WYNIKI SYMULACJI

Do analizy, jako materiał obrabiany zastosowano model sprężysto/lepko-plastyczny z umocnieniem liniowym o parametrach odpowiadających stali C45. Narzędzie nagniatające (rolkę) zamodelowano jako idealnie sztywne i nieodkształcalne ( $E \rightarrow \infty$ ). Wałek nagniatany z naniesionymi nierównościami powierzchni obraca się z prędkością początkową równą  $V = 5$  m/s, następnie następuje dojazd elementu nagniatającego (rolki) do powierzchni obrabianej. Kontakt rolki z powierzchnią powoduje również obrót rolki. Obiekty podzielono na elementy skończone, które zagęszczono w strefie kontaktu (rys. 3a). Istotne jest, aby siatka była dostatecznie gęsta, gdyż wpływa to na dokładność obliczeń numerycznych. W rozpatrywanym przypadku obiekt podzielono na 142180 elementów skończonych, posiadał on 145920 węzłów (rys. 3b). Przykładowe analizy przeprowadzono dla przypadku przestrzennego stanu odkształcenia i naprężenia.

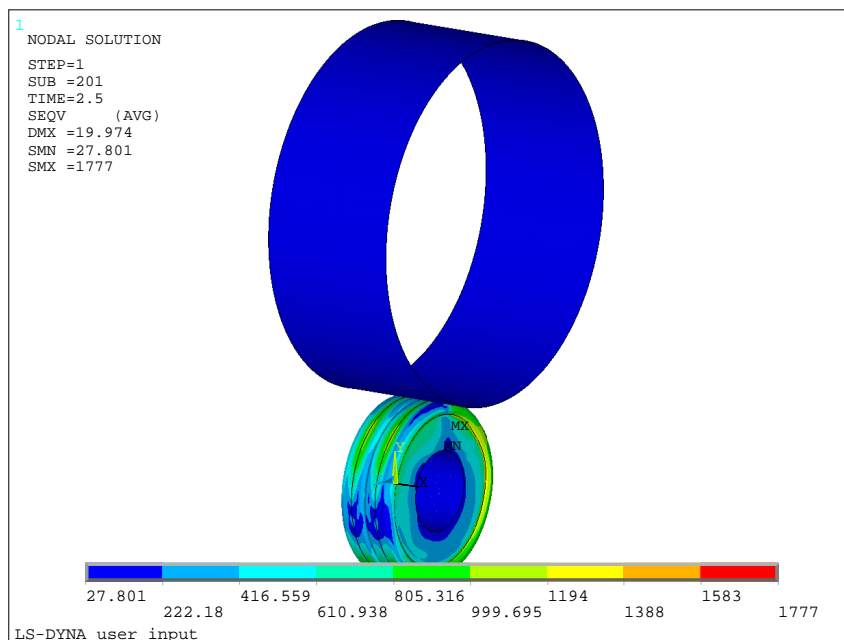


Rys. 3. Podział modelu geometrycznego na elementy skończone (a) i widok węzłów (b)

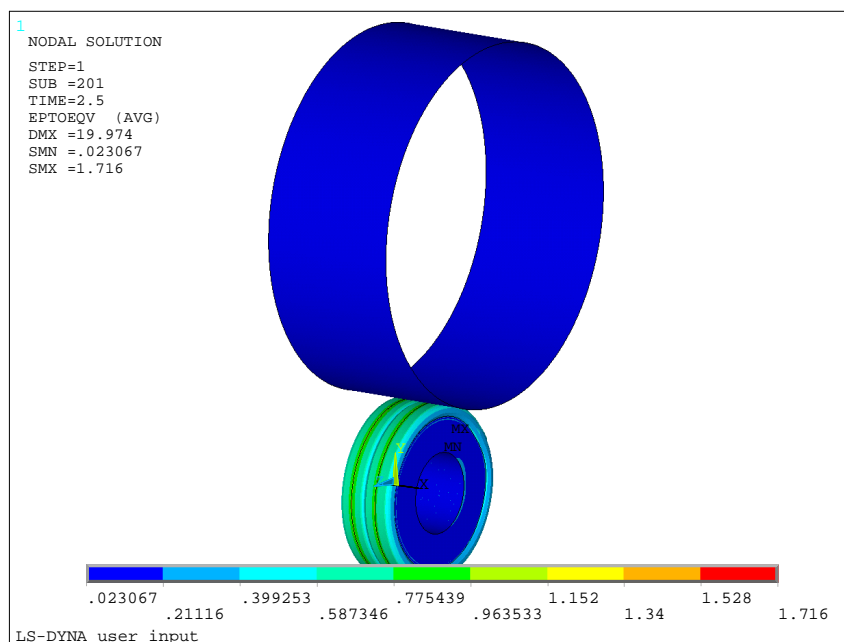
Na rysunku 4 przedstawiono wyniki deformacji siatki elementów skończonych w dwóch przykładowych krokach trwania procesu.



Rys. 4. Deformacja siatki elementów skończonych w dwóch krokach czasowych

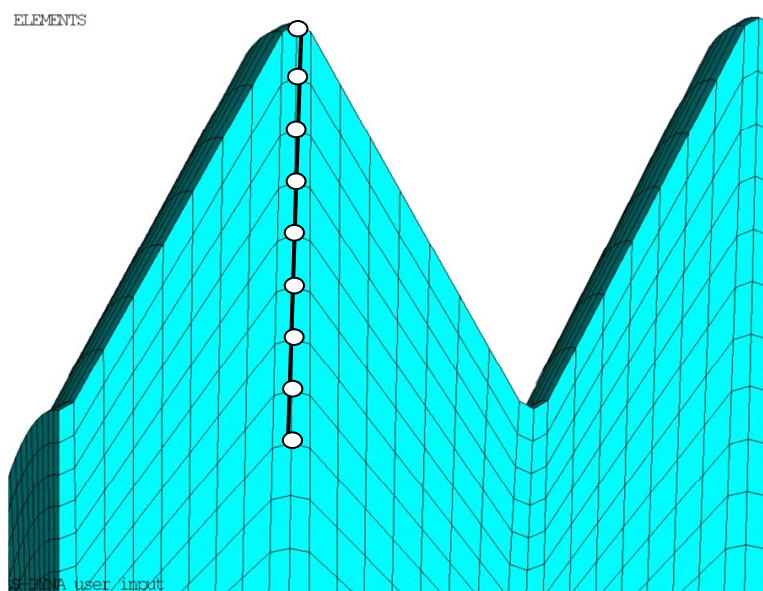


Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych

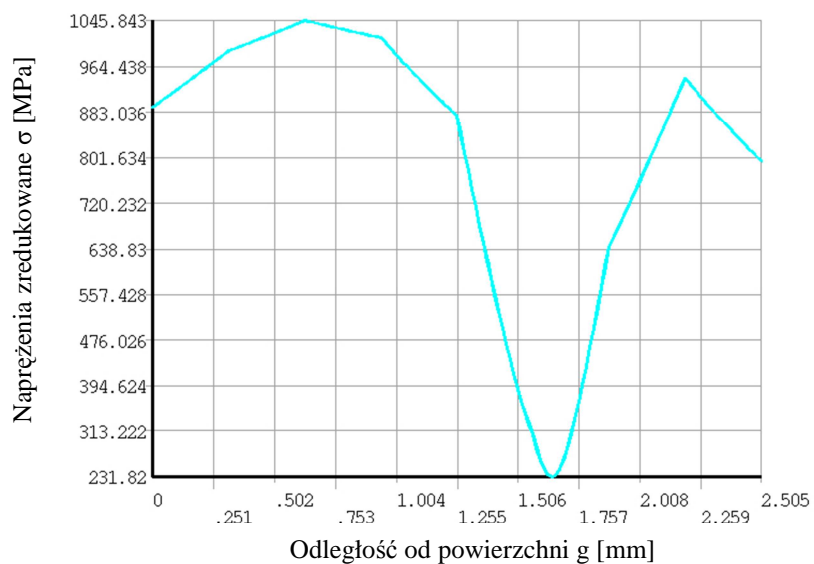


Rys. 7. Rozkład odkształceń zredukowanych

Zdefiniowaną ścieżkę odczytu wyników naprężeń w głąb materiału obrabianego przedstawiono na rysunku 8, zaś rozkład naprężeń wewnątrz warstwy wierzchniej dla analizowanego procesu przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 8. Zdefiniowana ścieżka odczytu naprężeń zredukowanych w głąb materiału



Rys. 9. Rozkład naprężeń zredukowanych w funkcji odległości od powierzchni  $\sigma=f(g)$



## 5. WNIOSKI

Opracowana aplikacja 3D umożliwiła przeprowadzenie procesu nagniatania powierzchni chropowatej. W rezultacie uzyskano rozkłady stanów naprężeń, odkształceń, deformację siatek elementów skończonych w dowolnej chwili czasowej oraz rozkład naprężeń zredukowanych w funkcji odległości od powierzchni.

Analiza numeryczna metodą elementów skończonych stanowi doskonałe narzędzie, gdyż pozwala przeprowadzać symulacje numeryczne złożonych zagadnień nieliniowej dynamiki ciał będących w kontakcie. Należy jednak pamiętać, że analiza numeryczna wielokrotnie nieliniowych zagadnień kontaktowych wiąże się z koniecznością rozwiązywania wielu problemów dotyczących ograniczeń metod obliczeniowych, modelowania materiałowego, zagadnień kontaktowych oraz złożonych obciążeń dynamicznych. Konieczna jest również właściwa weryfikacja modeli numerycznych oraz uzyskiwanych wyników, gdyż dopiero odpowiednie połączenie wiedzy z zakresu dynamiki i badań doświadczalnych pozwala na zapewnienie wiarygodności rezultatów.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*. Warszawa, WNT 1987.
- [2] Kleiber M.: *Wprowadzenie do metody elementów skończonych*. Materiały dla studiów doktoranckich i podyplomowych nr 9, Poznań, Politechnika Poznańska 1984.
- [3] Bathe K.J., Wilson E.L.: *Numerical methods in finite Elements Analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1976.