

Modelowanie i analiza numeryczna wybranych aspektów procesu nagniatania

Agnieszka Kułakowska, Radosław Patyk, Marcin Kułakowski

Słowa kluczowe: obróbka nagniataniem, analiza numeryczna, modelowanie procesu, symulacja komputerowa, MES

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki modelowania komputerowego i symulacji procesu nagniatania naporowego tocznego powierzchni części. Opracowano w tym celu aplikacje 3D w programie wykorzystującym MES do symulacji zjawisk fizycznych zachodzących podczas nagniatania powierzchni chropowatych w dowolnej chwili czasowej. Opracowano model fizyczny, matematyczny i komputerowy procesu. Przedstawiono m.in.: mapy odkształceń i naprężeń zredukowanych, głębokości zalegania naprężeń, wartość siły głównej nagniatania.

Wstęp

Technika motoryzacyjna rozwinięta jest na bardzo wysokim poziomie. Koncerny wprowadzają coraz to nowsze, lepsze a także innowacyjne produkty. 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 własności 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 nagniataniem, która polega na miejscowym powierzchniowym odkształceniu plastycznym na zimno za pomocą twardego i gładkiego elementu w kształcie kulki, krążka, rolki. Ma ona miejsce wtedy, gdy zgniót jest ograniczony do warstwy wierzchniej przedmiotu. Nagniatanie powoduje zmniejszenie chropowatości powierzchni oraz utwardzenie warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu [5, 7, 12, 14, 15, 17, 18, 21-28].

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. Przykłady zastosowania MES do analiz procesów

technologicznych znaleźć można w pracach [1÷4, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 16, 19, 20-28].

W pracy przedstawiono wyniki analizy numerycznej procesu nagniatania naporowego tocznego z wykorzystaniem programów wykorzystujących MES. Opracowane algorytmy i aplikacje komputerowe w systemie 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.

1. Metoda rozwiązania problemu

Proces nagniatania jest geometrycznie i fizycznie nieliniowym problemem brzegowo-początkowym, w którym warunki brzegowe są nieznanne w obszarach kontaktu narzędzia z przedmiotem. Analityczne rozwiązanie tego problemu jest niemożliwe. Możliwe jest rozwiązanie przybliżone przy wykorzystaniu metod numerycznych. Wykorzystanie sformułowania przyrostowego w uaktualnionym opisie Lagrange'a oraz nowoczesnych metod numerycznych i systemów pozwala na analizę złożonych zjawisk fizycznych zachodzących w procesie nagniatania naporowego tocznego.

Równanie opisujące ruch i deformację obiektu na typowym kroku przyrostowym $t \rightarrow \tau = t + \Delta t$ w uaktualnionym opisie Lagrange'a ma postać [8, 27, 28]:

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

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 $t \rightarrow \tau = t + \Delta t$,

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

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

$\{\tau\}^{\Delta \ddot{\mathbf{r}}}$ - 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 $\{\tau\}^{\Delta \mathbf{r}}$, przyrostu prędkości węzłów $\{\tau\}^{\Delta \dot{\mathbf{r}}}$, przyrostu przyspieszeń węzłów $\{\tau\}^{\Delta \ddot{\mathbf{r}}}$. Również część składowych wektora przyrostu obciążeń zewnętrznych (tj. dotyczących obszarów kontaktu ciała) 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 $t+\Delta t$.

2. Analiza numeryczna

Założono, że w procesie nagniatania w przedmiocie występuje przestrzenny stan naprężeń i odkształceń. Opracowana aplikacja w systemach MES umożliwia kompleksową analizę czasową stanów deformacji (przemieszczeń, odkształceń) i naprężeń, występujących w obiekcie składającym się z przedmiotu i narzędzia, dla przestrzennych stanów naprężeń i stanów przemieszczenia i odkształcenia. Możliwa jest pełna analiza dla następujących danych:

- dowolna geometria przedmiotu (np. wałek, tuleja, płaszczyna, stożek) i narzędzia (kula, wielobok, wielościan itp.), a także ich zmienności w trakcie realizacji procesu,
- dowolny materiał przedmiotu oraz materiał narzędzia (dowolny moduł Younga, nieliniowa zależność właściwości plastycznych materiału od: intensywności odkształceń, intensywności prędkości odkształceń i różne modele umocnienia itp.),
- dowolna struktura geometryczna powierzchni po obróbkach poprzedzających,
- dowolne odchyłki wysokości i odstępu nierówności o zdeterminowanym, trójkątnym zarysie,
- różne warunki tarcia w obszarze kontaktu,
- dowolne przemieszczenie poziome i pionowe narzędzia w czasie,
- dowolne warunki początkowe i brzegowe dla przemieszczeń, prędkości przemieszczeń, odkształceń, prędkości odkształceń i naprężeń.

Obliczenia numeryczne w systemach MES realizowano według następującego algorytmu:

a) przygotowanie danych:

- określenie geometrii przedmiotu i narzędzia,
- utworzenie punktów węzłowych,
- zdefiniowanie właściwości materiału obrabianego i narzędzia,
- generowanie siatki elementów skończonych,

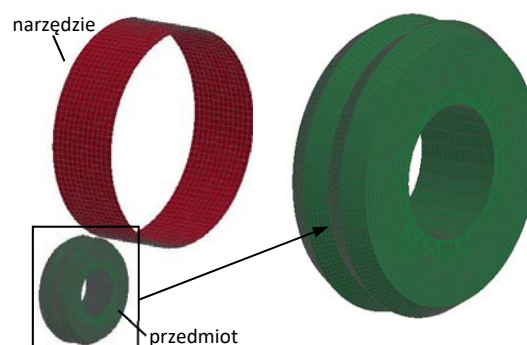
b) obliczenia:

- wprowadzenie modelu kontaktu,
- wprowadzenie całkowitego czasu obliczeń,
- wprowadzenie obciążeń, warunków początkowych i brzegowych,
- ustawienia przebiegu obliczeń,

c) analiza rozwiązania i edycja wyników.

Analizę wykonano przy następujących założeniach:

- przedmiot traktowano jako ciało sprężyste (w zakresie odkształceń odwracalnych) oraz lepko-plastyczne (w zakresie odkształceń nieodwracalnych), natomiast narzędzie (krążek) traktowano jako ciało idealnie sztywne,
- w przyrostowych modelach materiałowych założono, że przedmiot wykonany jest ze stali C45, z parametrami tj. moduł Younga $E = 210$ GPa i Poissona $\nu = 0,29$, granica plastyczności $Re = 425$ MPa, moduł umocnienia $E_T = 1024$ MPa.
- dyskretyzację obiektu wykonano przy zastosowaniu elementów skończonych typu solid (przedmiot) (z liniową funkcją kształtu), elementów typu shell (narzędzie) i elementów kontaktowych (kontakt narzędzia z przedmiotem).
- model zawierał 244388 elementów skończonych, natomiast węzłów 258205. Liczba stopni swobody, przy założeniu jedynie składowych translacyjnych, wynosi (dla $\theta = 120^\circ$) $N = 613\,454$.
- przyjęto nieliniowy, anizotropowy model tarcia Coulomba oraz współczynnik tarcia statycznego $\mu_s = 0,1$ i dynamicznego $\mu_d = 0,05$.
- zadano adekwatne warunki brzegowe – głównie dotyczące przemieszczeń: zagłębienie narzędzia (do wartości równej 0,5 wysokości nierówności) oraz odebrano stopnie swobody dla przedmiotu, a także dotyczące zadanej prędkości obrotowej zapewniającej wymaganą prędkość nagniatania $v_n = 0,52$ m·s⁻¹. W tym przypadku wałek z nierównościami powierzchni obracał się z obrotami $n = 477$ obr·min⁻¹, następnie element nagniatający (rolka) był dosuwany do powierzchni nagniatanej.
- Kontakt rolki z powierzchnią obrabianą powodował obrót narzędzia. W kolejnym kroku wprowadzono metody rozwiązania dyskretnego równania ruchu. W tym celu, zgodnie z przyjętym algorytmem rozwiązania jawnego (explicit), na każdym kroku analizy wprowadzono aproksymację wektora kolumnowego przyrostu przyspieszeń i prędkości w funkcji wektora kolumnowego przyrostu przemieszczeń, wszystkie o wymiarze $N \times 1$.

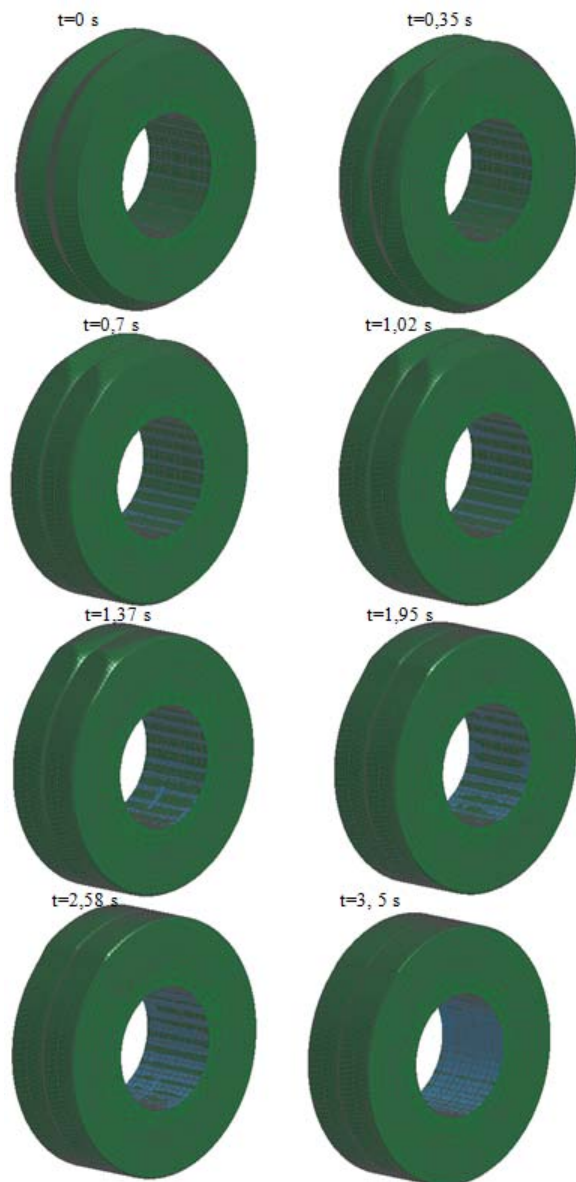


Rys. 1. Model geometryczny z siatką elementów skończonych

- Następnie określono wartość drgań własnych układu, graniczną wartość przyrostu czasu Δt_{kr} oraz obliczono stałe całkowania i zadano wymaganą liczbę kroków, a także całkowity czas obliczeń $t = 3,5$ s.

3. Wyniki symulacji komputerowych

Przykładowe wyniki deformacji modelu i siatki elementów skończonych w kolejnych krokach czasowych przedstawiono na rysunku 2.

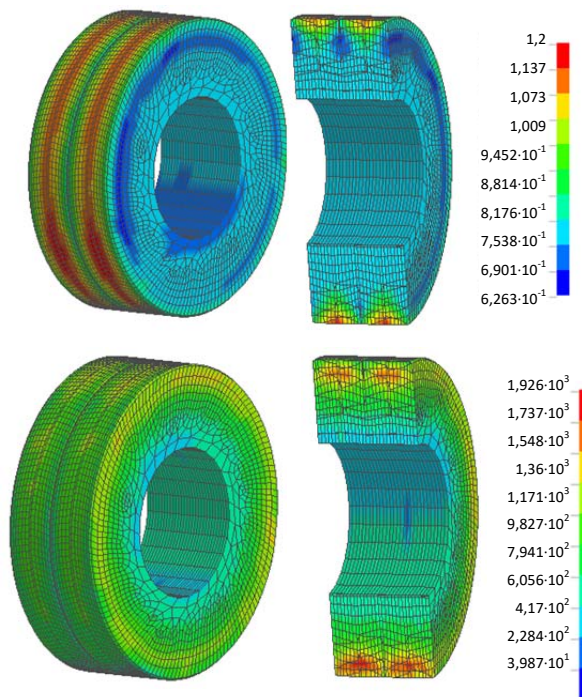


Rys. 2. Deformacja modelu z siatką elementów skończonych

Mapy odkształceń zredukowanych dla fragmentu wałka oraz przekroju, dla kątów wierzchołkowych nierówności przyjmujących wartości $\theta = 120^\circ$ i odstępów nierówności $s=2,7$ mm=const wraz ze skalą wskazującą uzyskany rezultat przedstawiono na rysunku 3.

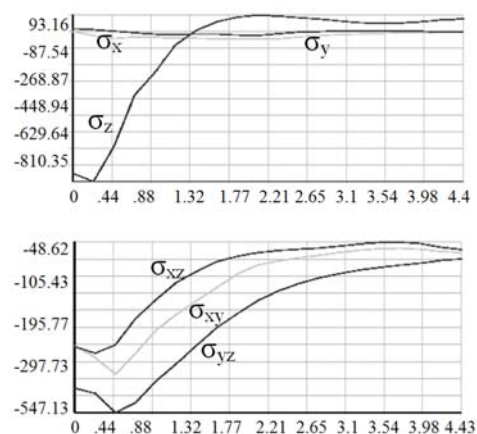
Mapy naprężeń zredukowanych dla fragmentu wałka oraz przekroju, dla kąta wierzchołkowego nierówności $\theta = 120^\circ$ wraz ze skalą wskazującą uzyskany rezultat, przedstawiono na rysunku 4.

Największe wartości naprężeń zredukowanych po nagniataniu występują w obszarze zdeformowanej, trójkątnej nierówności, w pewnej odległości od powierzchni (wokół punktu Bielajewa).



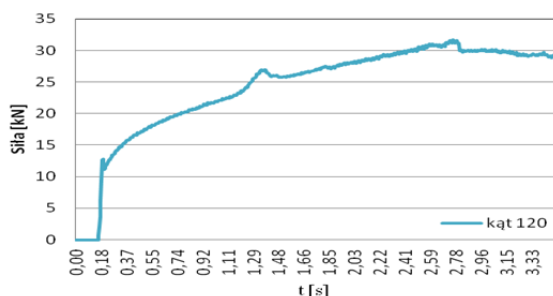
Rys. 4. Mapa naprężeń zredukowanych

Na bazie symulacji komputerowych opracowano wykresy przedstawiające rozkład składowych naprężeń normalnych σ_x , σ_y , σ_z oraz składowych stycznych σ_{xy} , σ_{xz} , σ_{yz} tensora naprężeń (rys. 5), występujących w trakcie procesu nagniatania toczonego w zależności od głębokości ich zalegania.



Rys. 5. Rozkład składowych normalnych (a) oraz rozkład składowych stycznych tensora naprężeń (b) uzyskanych na podstawie symulacji procesu nagniatania powierzchni chropowatej o trójkątnym zarysie po toczeniu (kąt wierzchołkowy nierówności $\theta=120^\circ$)

W trakcie procesu nagniatania regularnych trójkątnych nierówności powierzchni wejściowej, składowa normalna siły nagniatania rośnie (rys. 6), po czym po osiągnięciu pewnej maksymalnej wartości zależnej m.in. od geometrii nierówności po obróbkach poprzedzających, nieznacznie maleje i pozostaje na stałym poziomie.



Rys. 6. Przebieg składowej normalnej siły nagniatania w czasie, w trakcie procesu nagniatania regularnych, trójkątnych nierówności powierzchni wejściowych o kątach wierzchołkowych $\theta=120^\circ$, dla głębokości nagniatania $a_r=0,5R_i$, $Re=425\text{ MPa}$, $E_T=1024\text{ MPa}$, $s=2,7\text{ mm}$

Wnioski i podsumowanie

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, wartość siły głównej nagniatania czy nacisków w czasie.

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.

Bibliografia

1. Kulakowska A., Patyk R.: *Numeryczna analiza drgań układu korbowo-tłokowego*, autobusy - technika. eksploatacja, systemy transportowe nr 5, 2011, s. 329÷333.
2. Kulakowska A., Patyk R.: *Topologiczna optymalizacja konstrukcji na przykładzie widłaka wału przegubowego*, czasopismo Autobusy, ISSN 1509-5878, nr 5/2012, s. 377÷380.
3. Kukielka L., Kulakowska A., Patyk R.: Numerical modeling and simulation of the movable contact tool-worpiece and application in technological processes, *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2010, Vol. 8/3, pp. 36-41.
4. Kulakowska A., Kukielka L.: Numerical analysis and experimental researches of burnishing rolling process with taking into account deviations in the surface asperities outline after previous treatment. *Steel Research International* 2008, vol. 2, pp. 42-48.
5. Kulakowska A.: Experimental researches of burnishing rolling process of regular surface asperities prepared in turning process. *Steel Research International* 2012. Special Edition: 14th International Conference on Metal Forming, pp. 127-131.
6. Kulakowska A., Kukielka L., Kukielka K., Patyk R., Malag L., Bohdal L.: Possibility of Steering of Product Surface Layers Properties in Burnishing Rolling Process. *Applied Mechanics and Materials* 2014, vol. 474, pp. 442-447.

7. Kulakowska A., Patyk R., Bohdal Ł.: Zastosowanie obróbki nagniataniem w tworzeniu ekologicznego produktu, *Rocznik Ochrony Środowiska (Annual Set The Environment Protection)* 2014, vol. 16, pp. 323-335.
8. Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Patyk R., Malag L., Bohdal L.: Incremental Modelling and Numerical Solution of the Contact Problem between Movable Elastic and Elastic/Visco-Plastic Bodies and Application in the Technological Processes. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 474, pp. 159-165.
9. Kukielka K., Kukielka L., Bohdal L., Kulakowska A., Malag L., Patyk R.: 3D Numerical Analysis the State of Elastic/Visco-Plastic Strain in the External Round Thread Rolled on Cold. *Applied Mechanics and Materials* 2014, vol. 474, pp. 436-441.
10. Kukielka L., Geleta K., Kukielka K.: Modelling of Initial and Boundary Problems with Geometrical and Physical Nonlinearity and its Application in Burnishing Processes. *Steel Research International. Special Edition: 14th International Conference Metal Forming*, 2012, pp. 1375-1378.
11. Malag L., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Bohdal L., Patyk R.: Problems Determining of the Mechanical Properties of Metallic Materials from the Tensile Test in the Aspect of Numerical Calculations of the Technological Processes. *Applied Mechanics and Materials* 2014, vol. 474, pp. 454-459.
12. Patyk R., Kulakowska A., Bohdal L.: Ekologiczne, ekonomiczne i eksploatacyjne aspekty stosowania obróbki nagniataniem, *Rocznik Ochrony Środowiska (Annual Set The Environment Protection)* 2014, vol. 16, pp. 351-362.
13. Patyk R., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Malag L., Bohdal L.: Numerical Study of the Influence of Surface Regular Asperities Prepared in Previous Treatment by Embossing Process on the Object Surface Layer State after Burnishing. *Applied Mechanics and Materials* 2014, vol. 474, pp. 448-453.
14. Patyk R.: Theoretical and experimental basis of regular asperities about triangular outline embossing technology, *Steel Research International*. Vol. 81, Issue 9/2010, WILEY-V CH VERLAG GMBH, pp. 190÷193.
15. Patyk R.: New method of technological surface layer shaping of machine parts during duplex burnishing rolling process. *Steel Research International*, 2012, WILEY-V CH VERLAG GMBH, pp. 115-118.
16. Patyk R., Kukielka L.: Prognozowanie wytrzymałości zmeczeniowej zęba kultywatora z wykorzystaniem metod numerycznych, vol. 13/2009, *Inżynieria Rolnicza*, pp. 181-287.
17. Patyk R., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Szczepanik K.: Analiza ubytku właściwości użytkowych noży pielnika aktywnego, vol. 15/2011, *Inżynieria Rolnicza*, pp. 223-229.
18. Patyk, S., Patyk R., Kukielka L., Kulakowska A.: Eksperymentalne i numeryczne metody określania parametrów siłowych w procesie nagniatania tocznego powierzchni chropowatej, vol. 56/2010, *Pomiary Automatyka Kontrola*, pp. 620 – 623.
19. Patyk R., Kulakowska A., Bohdal Ł.: Ekologiczne, ekonomiczne i eksploatacyjne aspekty stosowania obróbki nagniataniem, vol. 16/2014, issue 1, *Rocznik Ochrona Środowiska*, pp. 351-362.
20. Patyk R., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Malag L., Bohdal L.: Numerical Study of the Influence of Surface Regular Asperities Prepared in Previous Treatment by Embossing Process on the Object Surface Layer State

- after Burnishing, Applied Mechanics and Materials 2014, vol. 474, pp. 448÷453.
21. Patyk R., Patyk S., Kukielka L.: Określanie głównej siły nagniatania chropowatej powierzchni walcowej o regularnym okresowym zarysie nierówności metodami numerycznymi, Mechanik, vol. 88/2015, s. 281÷288.
 22. Kukielka L.: Theoretical and experimental foundations of surface roller burnishing with the electrocontact heating, Book of Mechanical Engineering. Technical University of Koszalin, 47, p. 348, 1994.
 23. Kukielka L., Geleta K., Kukielka K.: Modelling and Analysis of Nonlinear Physical Phenomena in the Burnishing Rolling Operation with Electrical Current. Steel Research International. Special Edition: 14th International Conference Metal Forming, 2012, pp. 1379÷1382.
 24. Kukielka L.: Mathematical modelling and numerical simulation of nonlinear deformation of the asperity in the burnishing cold rolling operation. WIT Transactions on Engineering Sciences vol. 32, WITPRESS, 2001.
 25. Kułakowska A., Kukielka L.: Problematyka przygotowania powierzchni w procesie toczenia w aspekcie jakości technologicznej wyrobu nagniatanego. Pomiary, Automatyka, Kontrola tom. 54, 7, 2008, pp. 421-424.
 26. Kukielka L., Kułakowska A., Patyk R.: Numerical analysis of embossing process of regular inequalities with triangular outline on cylindrical semi product. Journal of Systemics, vol. 8, 2010.
 27. Kukielka L., Kukielka K.: Modelling and analysis of the technological processes using finite element method. Mechanik vol. 88, (3CD), 2015, pp. 317-340.
 28. Kukielka L.: Numerical Modelling: The Contact Problem Of Movable Elasto/visco-plastic Body. WIT Transactions on Engineering Sciences, vo. 38, WITPRESS, 2003.

Autorzy:

Dr inż. **Agnieszka Kułakowska** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów

Dr inż. **Radosław Patyk** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów

Mgr inż. **Marcin Kułakowski** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny

Modeling and numerical analysis of chosen aspects of rolling burnishing

The work is about computer modeling and simulation of the burnishing rolling process of parts. In this aim a 3D application in programs using MES 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 as: of strain, stress distribution and the depth of the stress residual, force vaue are presented.

Key words: burnishing rolling, process modelling, computer simulation, numerical analysis, FEM.