

Analiza numeryczna wybranych aspektów procesu walcowania zewnętrznych gwintów metrycznych

Krzysztof Kukielka

Słowa kluczowe: analiza numeryczna, proces walcowania, zewnętrzny gwint metryczny

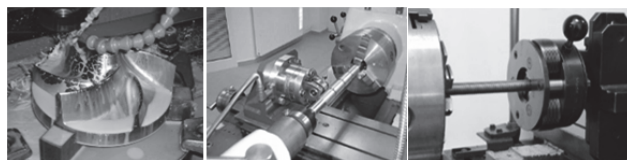
Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki modelowania komputerowego i analizy procesu walcowania metrycznych gwintów zewnętrznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Zamieszczono przykładowe mapy przemieszczeń wypadkowych oraz zastępczych odkształceń i naprężeń.

Wstęp

Jednym z podstawowych problemów precyzyjnej obróbki części samochodowych jest kształtowanie jakości wyrobu o z góry narzuconych właściwościach. Ważną operacją procesu technologicznego wytwarzania wyrobu jest jego obróbka wykańczająca, podczas której kształtowane są ostatecznie podstawowe właściwości użytkowe warstwy wierzchniej. Właściwości te, w określonych warunkach eksploatacji, mają decydujący wpływ na niezawodność maszyn.

Fakt stykania się ciał, w którym jedno z nich lub oba są odkształcalne, świadczy o występowaniu w tym procesie wielu zjawisk mechanicznych. Ich różnorodność powoduje, że zagadnienia kontaktowe zajmują specjalną pozycję w mechanice ciała stałego. Wynika to ze złożonego charakteru zjawisk zachodzących podczas kontaktu oraz trudności w ich badaniu i opisywaniu. W zagadnieniu kontaktowym występuje nieliniowość geometryczna i fizyczna. Ponadto warunki brzegowe są najczęściej ruchome i tylko częściowo określone. W takich przypadkach konieczne jest zastosowanie opisu przyrostowego.



Rys. 1. Zagadnienie kontaktowe w operacji frezowania (a), nagniatania (b) i walcowania (c)

Istnieje wiele programów wykorzystujących Metodę Elementów Skończonych, wspomagających prace inżynierskie w zakresie CAD, CAM, CIM i CAE. Przykładowe z nich, służące do wspomagania procesu obliczeń inżynierskich (CAE), to: FEMAP, ABAQUS, ANSYS, ADINA, ADAMS, COSMOS/M, MSC/NASTRAN.

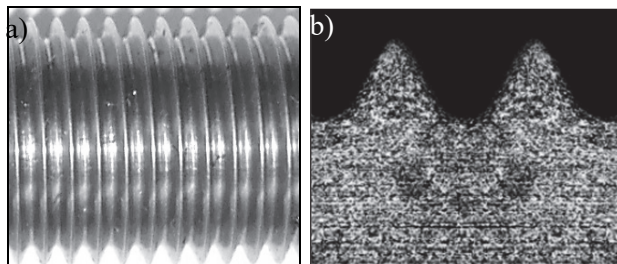
W Katedrze Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej

opracowano aplikacje w systemie ANSYS (w języku APDL), które umożliwiają kompleksową analizę czasową stanów deformacji (przemieszczeń, odkształceń) i naprężeń, zarówno dla stanów przestrzennych, jak i płaskich, występujących w wyrobie w trakcie i po procesach technologicznych precyzyjnej obróbki: cięcia elementów podzespołów samochodowych [1, 2], przemieszczenia klina jako odzwierciedlenie procesów skrawania i nagniatania ślizgowego [4], skrawania pojedynczym ziarnem ściernym [5], wytłaczania [8], walcowania gwintów [9-17], nagniatania typu duplex [26, 33], nagniatania tocznego i kulowania [18-22, 28, 29, 33, 34], szlifowania bezkłowego [20, 21] i nagniatania tocznego z prądem [23, 24]. W aplikacjach tych zastosowano podstawy teoretyczne oraz modelowanie procesów technologicznych precyzyjnej obróbki części wykorzystano do analizy, za pomocą Metody Elementów Skończonych [9, 13, 14, 25, 27].

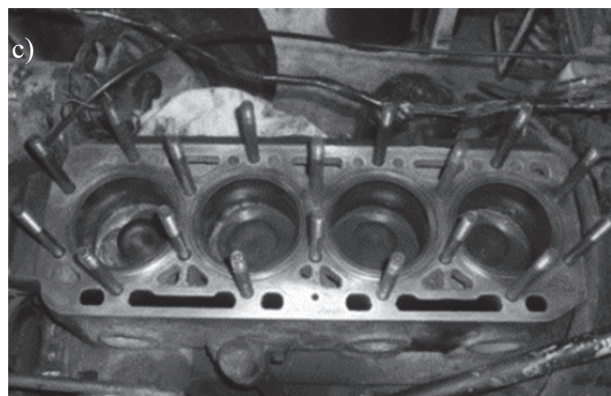
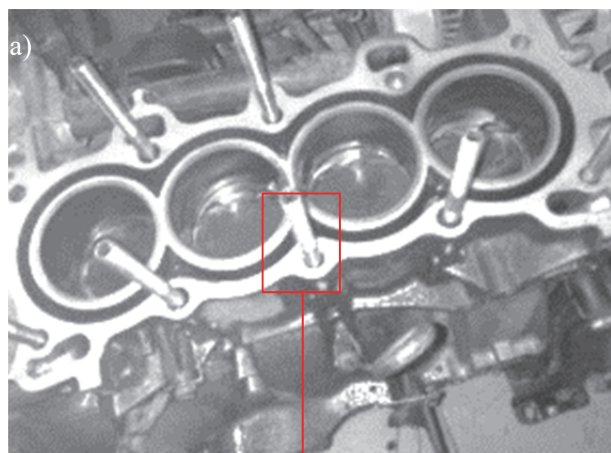
1. Proces walcowania gwintów metrycznych

Gwint jest elementem części śrubowych, które stanowią ilościowo najbardziej rozpowszechnioną grupę w produkcji przemysłu maszynowego. Większość współczesnych maszyn, urządzeń i mechanizmów ma gwintowe otwory lub czopy. Ma to wpływ na rozwój wielu metod jego wykonywania. Obecnie gwinty kształtuje się metodami obróbki wiorowej, plastycznej, ściernej i erozyjnej. Każda z tych metod obróbki ma właściwy dla siebie zakres zastosowania zależny od wymagań dotyczących dokładności wymiarowej, chropowatości powierzchni, własności materiału półwyrobu i wymiarów gwintu. Najszersze możliwości zastosowania ma metoda walcowania gwintu – obróbki plastycznej na zimno. Zastosowanie tej technologii daje szereg podstawowych korzyści, głównie podwyższenie fizyczno-mechanicznych właściwości gwintu, wzrost trwałości narzędzi, odporności na zużycie, dokładności wymiarowo-kształtowej oraz wydajności procesu walcowania. Korzystne właściwości eksploatacyjne gwintów walcowanych są wynikiem odkształceń plastycznych w gwincie (rys. 2) [3, 5-7, 9-17, 30-36].

W Katedrze Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów Politechniki Koszalińskiej prowadzone są badania naukowe nad opracowaniem metody walcowania gwintów o różnych zarysach, wytwarzanych z dużymi prędkościami i w podwyższonych temperaturach. Przykładowe części i układy w których z powodzeniem można stosować technologię walcowania gwintów na zimno przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 2. Widok walcowanej śruby z gwintem metrycznym (a) oraz jego mikrotekstura (b)

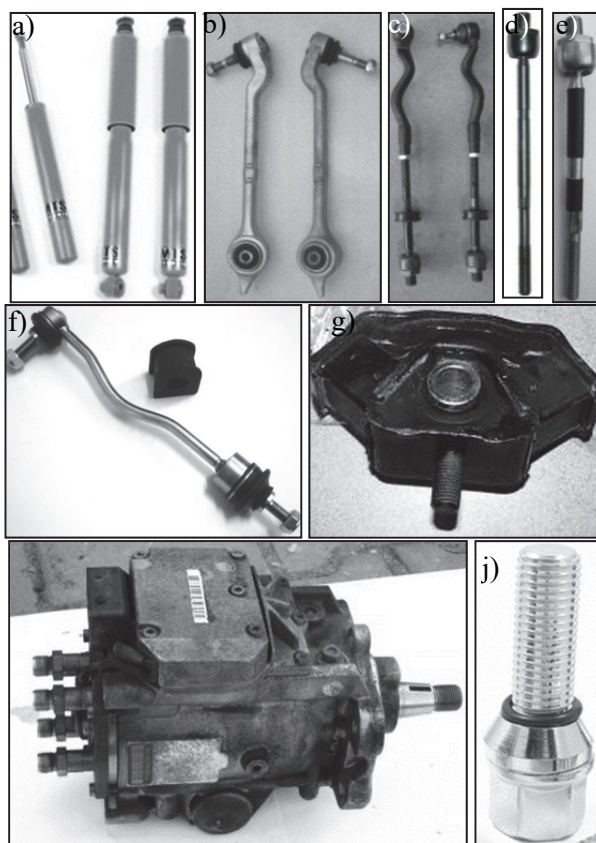


Rys. 3. Blok silnika wraz z wkręconymi szpilkami HONDY CIVIC B18C4 (a) oraz ZETOR 8011 (b) wraz z przykładowa szpilka (c)

Podstawowym problemem w tej technologii obróbki jest poznanie przebiegu zjawisk fizycznych oraz określenie stanów nacisków, przemieszczeń, odkształceń i naprężeń dla różnych warunków realizacji procesu [3, 5-7, 9-17, 27-39, 32, 33].

Wszystkie stosowane sposoby walcowania gwintów, ze względu np. na kinematykę walcowania, można podzielić na trzy grupy [3, 5-7, 9-17, 27-39, 32, 33]:

- walcowanie osiowe (zwane również przelotowym),
- walcowanie promieniowe (zwane również wgłębny),
- walcowanie styczne (zwane również poprzecznym).



Rys. 4. Przykładowe części i podzespoły samochodowe zawierające elementy lub części gwintowane: amortyzatory (a), wahacze (b), drążki kierownicze (c+e), stabilizatory (f, g), poduszka skrzyni biegów (h), pompa wtryskowa (i), śruby pływające (j)

2. Metoda rozwiązania problemu

Do rozwiązania postawionego problemu posłużono się metodą różnic centralnych zwaną także metodą jawnego całkowania (explicit) [9, 13, 20-22, 24]. Należy ona do większej grupy metod bezpośredniego całkowania dynamicznych równań ruchu. Równanie opisujące ruch obiektu na typowym kroku czasowym w uaktualnionym opisie Lagrange'a ma postać:

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

gdzie: \mathbf{M} - globalna macierz mas układu w chwili t , \mathbf{C} - globalna macierz tłumienia układu w chwili t , \mathbf{K} - globalna macierz sztywności układu w chwili t , $\Delta \mathbf{K}$ - globalna macierz przyrostu sztywności obiektu na kroku czasowym, $\Delta \mathbf{F}$ - wektor przyrostu obciążeń wewnętrznych obiektu, $\Delta \mathbf{R}$ - globalny wektor przyrostu obciążeń zewnętrznych obiektu, $\Delta \mathbf{r}$ - wektor przyrostu przemieszczeń węzłów obiektu, $\Delta \dot{\mathbf{r}}$ - wektor przyrostu prędkości węzłów obiektu, $\Delta \ddot{\mathbf{r}}$ - wektor przyrostu przyspieszeń węzłów obiektu. Macierze \mathbf{M} , \mathbf{C} i \mathbf{K} są stałe w czasie. Równanie (1) jest całkowane względem czasu metodą krok po kroku i ponadto nie jest przed tą operacją przekształcane.

Równanie (1) jest niemożliwe do rozwiązania ze względu na większą liczbę niewiadomych niż równań. Dysponując układem N równań ruchu i poszukuje się $3N$ niewiadomych $\dot{\mathbf{r}}$ i $\ddot{\mathbf{r}}$. Do wyrażenia wektorów $\dot{\mathbf{r}}$ i $\ddot{\mathbf{r}}$ za pomocą wektorów

przemieszczeń w chwilach $t-\Delta t$, t , $t+\Delta t$ zastosowano aproksymację metodą różnic centralnych. Metoda ta daje jedynie przybliżony wynik. Polega na przedstawieniu prędkości i przyspieszenia za pomocą przemieszczenia według wzorów:

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

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

Metoda różnic centralnych nie wymaga odwracania macierzy sztywności \mathbf{K} , co jest jej dużą zaletą, w szczególności przy diagonalnych macierzach mas i tłumienia. Podstawową wadą jest jednak brak bezwarunkowej stabilności algorytmu, co wymaga doboru długości kroku po czasie Δt w taki sposób, aby był on mniejszy od czasu krytycznego Δt_{kr} , zależnego od własności całego układu.

Otrzymane dyskretne równanie ruchu rozwiązuje się przy założeniu, że przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia układu są znane na początku w chwili $\tau=t_0$ i równe odpowiednio \mathbf{r}_0 , $\dot{\mathbf{r}}_0$, $\ddot{\mathbf{r}}_0$. Wtedy dzieli się cały przedział na części o długości Δt i w każdym z kroków szuka się rozwiązania dla równania (1). Czyli równanie to ma być spełnione tylko w wybranych chwilach czasowych, a nie w całym badanym przedziale. Oznacza to, że dla każdej chwili można poszukiwać położeń równowagi układu poddanego działaniu sił zewnętrznych, sił bezwładności oraz sił tłumienia, stosując algorytmy analizy statycznej. Koniec każdej chwili czasowej jest jednocześnie początkiem następczej.

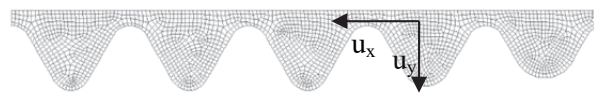
3. Analiza numeryczna procesu walcowania gwintów metrycznych

Opracowana aplikacja w systemie ANSYS/LS-DYNA umożliwia kompleksową analizę czasową stanów przemieszczeń, odkształceń i naprężeń występujących w trakcie jak i po procesie walcowania gwintów metrycznych. Do obliczeń numerycznych wykorzystano model materiałowy dla stali S235JR, które zamodelowano jako ciało sprężysto/lepko-plastyczne. Przyjęto, że czas symulacji wyniesie 2,6 ms.

Parametry materiałowe:

- **materiał modelu:** $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ – gęstość, $E = 210 \text{ GPa}$ – moduł Younga, $\nu = 0,3$ – współczynnik Poissona, $R_e = 300 \text{ MPa}$ – początkowa granica plastyczności, $E_T = 610 \text{ MPa}$ – moduł umocnienia liniowego oraz wybrano materiał typu Bilinear Isotropic,
- **materiał rolki:** $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ – gęstość, $E = 210 \text{ GPa}$ – moduł Younga, $\nu = 0,3$ – współczynnik Poissona oraz wybrano materiał typu Rigid (materiał się nie odkształca).

W przypadku gwintów metrycznych (rys. 4) na narzędzie nałożono przemieszczenie w kierunku u_y na głębokość równą połowie wysokości dla gwintu M27 równą $(d - d_3)/2 = (27 - 23,054)/2 = 0,99 \text{ mm}$, które stosowano zgodnie z tabelą 1. Przemieszczenia w kierunku u_x zadawano zgodnie z tabelą 1, co oznacza, że obliczenia przebiegają w 15 krokach. Na spodzie modelu odebrano translacyjne oraz rotacyjne stopnie swobody dla węzłów. Celem analiz numerycznych jest określenie map przemieszczeń, odkształceń i naprężeń powstających podczas walcowania gwintów metrycznych (rys. 5).



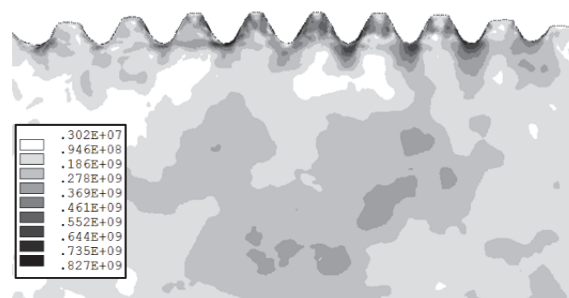
Rys. 5. Zarys rolki do walcowania gwintów metrycznych

Tab. 1. Warunki brzegowe dla narzędzia do walcowania gwintów metrycznych

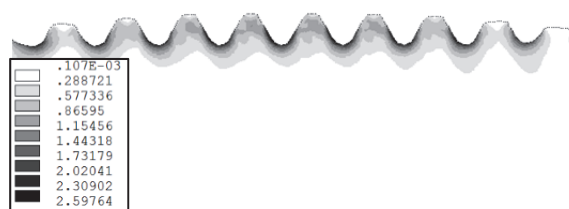
Krok	Przemieszczenie u_x (mm)	Przemieszczenie u_y (mm)
1	-3	0,0
2	-3	-0,99
3	-3	0,0
4	-6	0,0
5	-6	-0,99
6	-6	0,0
7	-9	0,0
8	-9	-0,99
9	-9	0,0
10	-12	0,0
11	-12	-0,99
12	-12	0,0
13	-15	0,0
14	-15	-0,99
15	-15	0,0

4. Wyniki symulacji komputerowej

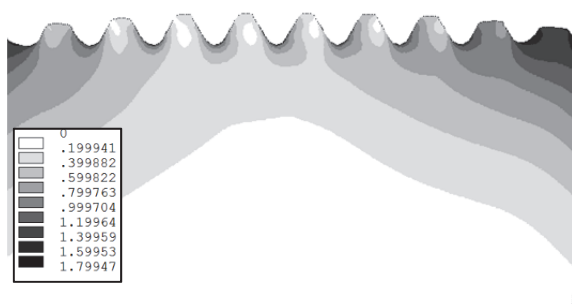
Otrzymane wyniki analizy numerycznej procesu walcowania zewnętrznych gwintów metrycznych przedstawiono na rysunkach 6÷8, gdzie przedstawiono odpowiednio mapy naprężeń i odkształceń zastępczych oraz przemieszczeń wypadkowych.



Rys. 6. Mapa naprężeń zastępczych w walcowanych gwintach metrycznych [Pa]



Rys. 7. Mapa odkształceń zastępczych w walcowanych gwintach metrycznych



Rys. 8. Mapa przemieszczeń wypadkowych w walcowanych gwintach metrycznych

5. Wnioski

Z przeprowadzonych analiz numerycznych wynikają następujące wnioski:

- Przebieg zjawisk fizycznych w strefie odkształceń podczas walcowania gwintów metrycznych istotnie zależy od warunków realizacji procesu.
- Na podstawie przebiegu zjawisk fizycznych w strefie walcowania można określać warunki realizacji procesu obróbki w celu zapewnienia wymaganych właściwości eksploatacyjnych lub dla zadanych warunków realizacji procesu można prognozować jakość technologiczną i właściwości eksploatacyjne gwintu.

Bibliografia

- Bohdal, L., Kukielka, L., Kukielka, K., Kulakowska, A., Maląg, L., Patyk, R.: Three Dimensional Finite Element Simulation of Sheet Metal Blanking Process. *Mechanics and Materials "Novel Trends in Production Devices and Systems"* Editors: Karol Velišek, Peter Košťál and Milan Nad, Vol. 474, 2014, pp. 430-435.
- Bohdal Ł., Kukielka L.: Modelowanie i analiza numeryczna procesu cięcia blach nożami krążkowymi z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej. *Mechanik* nr 8–9 2011, s. 712–716.
- Czarnecki H., Michalczyk H.: Modelowanie i symulacja procesu wygniatania gwintów wewnętrznych na zimno. *Mechanik*, nr 11/2014, Warszawa 2014, s. 13-24.
- Chodor, J., Kukielka, L.: Using Nonlinear Contact Mechanics in Process of Tool Edge Movement on Deformable Body to Analysis of Cutting and Sliding Burnishing Processes. *Mechanics and Materials "Novel Trends in Production Devices and Systems"* Editors: Karol Velišek, Peter Košťál and Milan Nad, Vol. 474, 2014, pp. 339–344.
- Choromańska M., Kukielka K., Kurcek R., Forsiewicz M.: Nowoczesne metody symulacyjne wspomagające proces doboru narzędzi ściernych do obróbki części samochodowych. *Autobusy - technika, eksploatacja, systemy transportowe* Nr 5, 2012, s. 129-136.
- Domblesky J.P., Feng F.: A parametric study of process parameters in external thread rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 121, ELSEVIER, 2002, pp. 341–349.
- Domblesky J.P., Feng F.: Two-dimensional and three-dimensional finite element models of external thread rolling. *Professional Engineering Publishing*, Volume 216, Number 4/2002, pp. 507–517.
- Kaldunski, P., Kukielka, L.: Numerical Analysis and Simulation of Drawpiece Forming Process by Finite Element Method. *Applied Mechanics and Materials "Novel Trends in Production Devices and Systems"*, Vol. 474, 2014, p. 153–158.
- Kukielka K., Kukielka L.: Modeling And Numerical Analysis Of The Thread Rolling Process, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Volume 6, Issue 1, Weinheim, 2006, pp. 745-746.
- Kukielka L., Kukielka K.: Numerical analysis of the process of trapezoidal thread rolling. *High Performance Structures and Materials*, Ed. C.A. Brebbia, WITPRESS, Southampton, Boston, 2006, pp. 663-672.
- Kukielka K., Kukielka L.: Numerical analysis of the physical phenomena in the working zone in the rolling process of the round thread. *Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Effect and Contact Mechanics VIII*, eds. J.T.M de Hosson, C.A. Brebia, S-I Nishida, WITPRESS, Southampton, Boston, 2007, pp. 125-134.
- Kukielka K.: Numerical simulations of deformation and stress in the cold rolled thread. *ARCHIWUM TECHNOLOGII MASZYN I AUTOMATYZACJI*, T. 31, Nr 1, 2011, pp. 57-66.
- Kukielka K.: Modelling the external thread rolling process using finite element method. *ARCHIWUM TECHNOLOGII MASZYN I AUTOMATYZACJI*, T. 31, Nr 3, 2011, pp. 49-58.
- Kukielka K.: Numerical modelling of the strain and stress states in the thread with quick pitch in rolling process on cold. *Pomiar Automatyka Kontrola*, nr 01, 2012, pp. 136-139.
- Kukielka K., Kukielka L., Bohdal L., Kulakowska A., Maląg 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 "Novel Trends in Production Devices and Systems"* Editors: Karol Velišek, Peter Košťál and Milan Nad, 2014, USA-SLOVAKIA, pp. 436-441.
- Kukielka K.: Numeryczne określenie wcisku walcowania i warunków smarowania w aspekcie jakości gwintu o zarysie łukowym o dużym skoku wykonywanym na rurach o dużej długości. *Mechanik* vol. 88, (3CD), 2015, pp. 348-358.
- Kukielka K.: Efektywny model numeryczny do analizy procesu walcowania gwintów trapezowych metodą elementu skończonego *Mechanik* vol. 87, (11CD), 2015, pp. 156-157.
- Kukielka L.: Theoretical and experimental foundations of surface roller burnishing with the electrocontact heating. *Book of Mechanical Engineering*. Technical University of Koszalin, No 47, 1994, pp. 348.
- Kukielka L.: Mathematical modelling and numerical simulation of non-linear deformation of the asperity in the burnishing cold rolling operation. Ed. Dominguez, J; Brebbia, CA *Computational methods in contact mechanics V Book Series: Computational and experimental methods* Vol. 32, 2001, Transactions on Engineering Sciences, WITPRESS, pp. 317-326, ISSN 1743-3533.
- Kukielka L., Kustra J.: *Numerical analysis of thermal phenomena and deformations in processing zone in the centreless continuous grinding process*, Computation Methods and Experimental Measurements for Surface Treatment Effects, WITPRESS, Southampton, Boston, 2003, pp.109-118.
- Kukielka L., Kustra J., Kukielka K.: *Numerical analysis of states of strain and stress of material during machining with a single abrasive grain*, in: J.T.M. de Hosson, C.A. Brebbia, S-I Nishida, *Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Effects and Contact Mechanics VII*, WITPRESS, Southampton-Boston, 2005, pp. 57-66.
- Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Patyk R., Maląg 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 "Novel Trends in Production Devices and Systems" Editors: Karol Velišek, Peter Košťál and Milan Nad, 2014, USA-SLOVAKIA, pp. 159-165.
23. Kukielka L., Geleta K., Kukielka K.: Modelling of initial and boundary problems with geometrical and physical nonlinearity and its application in burnishing processes. In: K. Mori, M. Pietrzyk, J. Kusiak, J. Majta, P. Hartley, J. Lin (Eds.), Steel Research International, Special Edition, 14th International Conference on Metal Forming, 2012, pp. 1375-1378.
 24. Kukielka L., Geleta K., Kukielka K.: *Modelling and Analysis of Nonlinear Physical Phenomena in the Burnishing Rolling Operation with Electrical Current*, in: K. Mori, M. Pietrzyk, J. Kusiak, J. Majta, P. Hartley, J. Lin (Eds.), Steel Research International. Special Edition: 14th International Conference Metal Forming, 2012, pp. 1379-1382.
 25. Kukielka L., Kukielka K.: Modelling and analysis of the technological processes using finite element method. *Mechanik vol. 88, (3CD)*, 2015, pp. 317-340.
 26. Kukielka L., Patyk R., Kulakowska A., Kukielka K., Gotowała: Innowacyjna metodyka projektowania części samochodowych. *Logistyka vol. 6 (CD 1)*, 2014, s. 168-175.
 27. Kukielka S., Kukielka L.: Experiment Planner 1.0 – komputerowy program planowania eksperymentów rozpoznawczych i właściwych oraz identyfikacji i analizy modelu matematycznego obiektu badań, Praca magisterska, Politechnika Koszalińska WM, Koszalin, 2002.
 28. Kulakowska A., Kukielka L.: Wpływ odchyłek zarysu regularnych nierówności powierzchni po obróbce toczeniem na wybrane właściwości warstwy wierzchniej wyrobu nagniatanego tocznie. Praca doktorska, Politechnika Koszalińska, Koszalin, 2006.
 29. 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*, 2, 2008, pp. 42-48.
 30. Łyczko K.: *Technologia walcowania gwintów zewnętrznych*. WNT, Warszawa, 2010.
 31. Pater Z., Gontarz A., Weroni W.: New method of thread rolling. *Journal of Materials Processing Technology Volume 153–154, ELSEVIER*, 2004, pp. 722÷728.
 32. Pater Z., Gontarz A., Weroni W.: Cross-wedge rolling by means of one flat wedge and two shaped rolls. *Journal of Materials Processing Technology, Volume 177, ELSEVIER*, 2006, pp. 550÷554.
 33. Patyk, R., Kukielka L.: Projekt nowej metody sterowania rozkładem naprężeń własnych w procesie wielokrotnego hybrydowego nagniatania gładkościowo-umacniającego. *ARCHIWUM TECHNOLOGII MASZYN I AUTOMATYZACJI Tom 30 Nr 1*, 2010, s. 143-150.
 34. Szczepanik K., Kukielka L., Patyk R., Kukielka K.: Symulacja numeryczna zjawisk fizycznych podczas nagniatania tocznego w procesie regeneracji części maszyn rolniczych. *INŻYNIERIA ROLNICZA, Tom 5 Nr 130*, 2011, s. 283-290.
 35. Żońnik PP., and Pater Z.: Analiza numeryczna procesu walcowania poprzecznego gwintu śruby M20x2, 5 metodą styczną. *Obróbka Plastyczna Metali 21*, 2010, s. 155-167.
 36. Żurawski Z., Sikora J., Błużek J.: *Walcowanie gwintów*. WNT, Warszawa, 1962.

Autor:

Dr inż. **Krzysztof Kukielka** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Zakład Metrologii i Jakości

Numerical analysis of chosen aspects of the external metric thread rolling

In this article results of computer modeling and numerical analysis of the external metric thread rolling where Finite Elements Method were applied. Exemplary maps of displacement and equivalent strain and stress are presented.

Key words: numerical analysis, thread rolling process, external metric thread.