

*główna siła wygniatania, warstwa wierzchnia, stan powierzchni, technologia obróbki nagniataniem, metody numeryczne, modelowanie i symulacja procesów, Metoda Elementu Skończonego*  
*principal embossing force, surface layer, surface condition, burnishing processing technology,*  
*numerical methods, modeling and simulation of processes, Finite Element Method*

Radosław PATYK<sup>1</sup>  
Sylwia PATYK<sup>2</sup>  
Leon KUKIEŁKA<sup>3</sup>

## OKREŚLANIE NACISKÓW KONTAKTOWYCH PODCZAS PROCESU WYGNIATANIA REGULARNYCH NIERÓWNOŚCI NA POWIERZCHNIACH WALCOWYCH

W artykule przedstawiono nową technologię przygotowania powierzchni pod nagniatanie, polegającą na plastycznym kształtowaniu regularnych symetrycznych okresowych nierówności powierzchni. Tak przygotowana powierzchnia umożliwia uzyskiwanie warstwy wierzchniej wyrobu po nagniataniu o korzystniejszych właściwościach w porównaniu z tradycyjnymi metodami przygotowania powierzchni tj. toczenia, frezowania lub szlifowania. Dobór głównej siły wygniatania w analizowanym procesie jest zagadnieniem podstawowym. Natomiast jego rozwiązanie jest niezbędne do prawidłowego projektowania procesu technologicznego z zastosowaniem nagniatania. W ramach pracy, do rozwiązania problemu zastosowano metody analityczne oraz metody modelowania matematycznego i komputerowego. Opracowano algorytm umożliwiający określanie nacisków kontaktowych podczas wygniatania. Rozwiązanie opracowanego równania ruchu obiektu przeprowadzono z zastosowaniem MES. Porównano wyniki obliczeń nacisków kontaktowych metodami analitycznymi i numerycznymi.

## DETERMINING CONTACT PRESSURES DURING EMBOSSING PROCESS OF REGULAR ASPERITIES ON THE CYLINDRICAL SURFACES

In the paper, the new technology of surface preparation before burnishing was discussed. It involves the formation of a regular plastic, symmetric, periodic surface asperities. This specially prepared surface makes possible getting a better surface layer of the product after burnishing process then surfaces prepared during conventional treatment as turning or grinding. Selection of the main force embossing process is analyzed as a basic issue. On the other hand the solution of it, is essential to proper design process using plastic formation. In this work to solve the problem, the analytical and the physical, mathematical and computer modeling methods were used. An algorithm for specifying contact pressure during embossing was elaborated. The solution of developed equations of motion using FEM was developed. Contact pressure calculated analytically were compared with numerical solution.

### 1. WSTĘP

Problematyka świadomego kształtowania pożądanej ze względów eksploatacyjnych warstwy wierzchniej zajmowała badaczy od wielu lat. Długotrwałe badania zaowocowały powstaniem mnogości technologii poprawiających właściwości warstwy wierzchniej (obróbki ubytkowe, bezubytkowe, cieplne, chemiczne itd.). Do około dziewięćdziesiątych lat XX wieku w technice występował trend zwiększania trwałości części maszyn. Wymagania ekonomiczne zmieniły istniejący nurt w kierunku projektowania i wytwarzania maszyn i urządzeń charakteryzujących się wysoką niezawodnością przy założonej z góry trwałości (niekoniecznie bardzo dużej). Takie postawienie problemu zaowocowało potrzebą badania dotychczasowych oraz opracowywania nowych technologii wytwarzania części maszyn w aspekcie możliwości sterowania kształtowanymi właściwościami [1÷13].

W obróbkach ubytkowych dość dobrze zbadane są możliwości sterowania parametrami technologicznymi procesów w celu osiągnięcia wymaganych parametrów stereometrycznych powierzchni obrabianych. Natomiast najważniejszy z punktu widzenia wytrzymałości stan naprężeń jest wielkością wynikową i dotychczas niesterowalną lub sterowalną w bardzo ograniczonym zakresie. Jedną z obróbek wykończeniowych części maszyn stosowanych w celu poprawienia stanu powierzchni i/lub stanu warstwy wierzchniej jest powierzchniowa obróbka plastyczna (nagniatanie). Nagniatanie stosuje się w celu: zwiększenia gładkości powierzchni, jej umocnienia oraz zwiększenie dokładności wymiarowo – kształtowej [1, 2, 4-7]. Z badań wynika, że jakość po nagniataniu istotnie zależy od jakości półfabrykatu po obróbkach poprzedzających. Zaleca się, aby zarys nierów-

<sup>1</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-453 Koszalin; ul. Śniadeckich 2, e-mail: radoslaw.patyk@tu.koszalin.pl

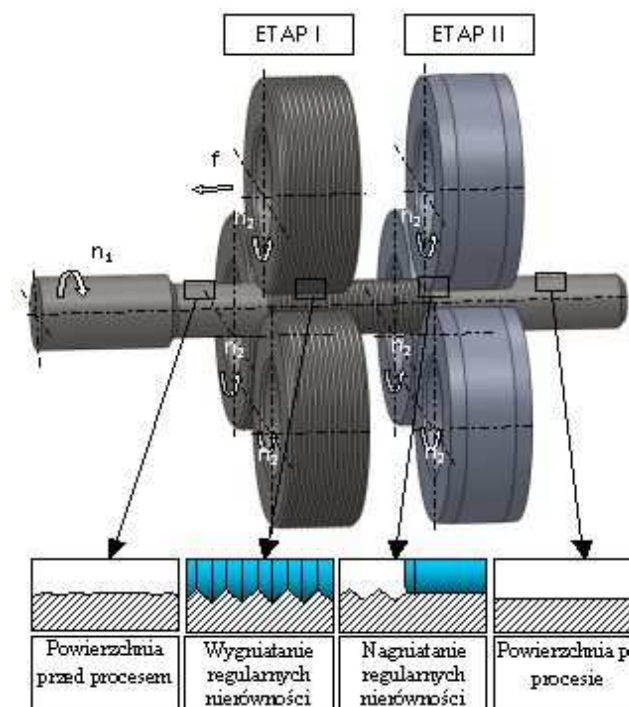
<sup>2</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-453 Koszalin; ul. Śniadeckich 2, e-mail: sylwia.patyk@interia.pl

<sup>3</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-453 Koszalin; ul. Śniadeckich 2, e-mail: leon.kukielka@tu.koszalin.pl

ności powierzchni do nagniatania był regularny, zdeterminowany i okresowy [2, 5, 8-11]. Obecnie jako obróbkę poprzedzającą nagniatanie stosuje się: toczenie, frezowanie i szlifowanie [1]. Obróbki te charakteryzują się ograniczoną trwałością narzędzi, które zużywają się w trakcie procesu oraz niestabilnością. Ukształtowany zarys nierówności istotnie różni się od zarysu teoretycznego, a jakość wyrobu po nagniataniu różni się od jakości pożądanej. Poza tym wymienione obróbki ubytkowe nie nadają się w ogóle lub mogą być stosowane w ograniczonym zakresie dla przedmiotów wiotkich oraz wykonanych z materiałów trudnoobrabialnych. W pracy zaproponowano nową metodę kształtowania technologicznej warstwy wierzchniej w procesie nagniatania typu duplex. Przewiduje się, że nowa technologia wyraźnie poprawi jakość kształtowanych części oraz umożliwi sterowanie rozkładem i głębokością zalegania naprężeń własnych po procesie obróbczym.

## 2. PODSTAWY TEORETYCZNE PROCESU

W pracy podjęto problematykę badania nowej metody kształtowania technologicznej warstwy wierzchniej części maszyn w procesie nagniatania gładkościowo-umacniającego typu duplex stosowanego w celu określenia podstawowych jej parametrów technologicznych, szczególnie nacisków w strefie kontaktu podczas procesu wygniatania regularnych nierówności powierzchni. Istotą nowej technologii stanowi wykonanie operacji nagniatania w dwóch etapach (rys. 1). W **etapie pierwszym**, na powierzchni półfabrykatu, wygnata się regularne nierówności o wymaganym zarysie (trójkątnym, łukowym, łukowo-liniowym lub innym) i parametrach zależnych od pożądanych właściwości warstwy wierzchniej wyrobu. W **etapie drugim** nierówności te zgniata się (nagniata gładkościowo), aż do wymaganego wyrównania nierówności. W zależności od przyjętej dotychczas znanej technologii nagniatania możliwe jest uzyskanie głębokości zalegania odkształceń plastycznych nawet do kilku milimetrów, przy czym nieodpowiednio dobrana siła nagniatania, lub wcisk nagniatania powodowały łuszczenie warstwy wierzchniej na skutek przekroczenia odkształceń granicznych w niej występujących. Proponowana nowa technologia wykorzystując efekt Bauschingera umożliwia wielokrotne odkształcanie warstwy wierzchniej bez jej zniszczenia, a w zależności od wielkości wygniatanych nierówności możliwe jest zwiększenie głębokości zalegania odkształceń plastycznych nawet do kilkunastu milimetrów.



Rys. 1. Schemat gładkościowo – umacniającego nagniatania toczonego typu duplex

Wygniatanie regularnych nierówności powierzchni jest jednym z podstawowych procesów analizowanych w obróbce plastycznej. Opracowane rozwiązania mają na celu lepsze poznanie procesów prasowania czy też przecinania. Niektóre z tych analiz próbuje się adoptować do procesów obróbki plastycznej gwintów o różnych zarysach czy też szczególnej obróbce polegającej na plastycznym ukształtowaniu regularnych nierówności, które następnie są nagniatane gładkościowo (jest to tzw. nagniatanie typu duplex). Obróbka ta ma za zadanie wyraźnie poprawić jakość technologiczną wyrobów oraz umożliwić sterowanie rozkładem i wartością naprężeń własnych

Kluczową rolę w projektowaniu procesów technologicznych jest znajomość wartości parametrów technologicznych oraz wpływu zmian ich wartości na jakość technologiczną. W obróbce powierzchniowej nagniataniem tocznym w zależności od zastosowanej technologii podstawowymi parametrami technologicznymi są: prędkość nagniatania, posuw nagniatania oraz siła lub głębokość wygniatania. Najtrudniejszym jest wyznaczenie odpowiedniej wartości siły lub wcisku nagniatania, które do mają wywoływać zamierzone skutki tzn. poprawienie stanu powierzchni części oraz ukonstytuowanie odpowiedniego stanu naprężeń w WW wyrobu. Wypadkową siłą nagniatania stanowi suma geometryczna jej składowych:  $F_1$  – siła styczna,  $F_2$  – siła osiowa (wzdłużna) oraz  $F_3$  – siła normalna zwana główną siłą nagniatania (rys. 2):

$$F = \sqrt{F_1 + F_2 + F_3}, \quad (1)$$

Nieprawidłowo dobrana siła nagniatania może być powodem niezyskania wymaganej (dużej) gładkości powierzchni lub łuszczenia się powierzchni. Zatem jest to determinujący parametr technologiczny procesu odpowiedzialny za jakość użytkową wyrobu. Wiadomo, że składową siłą nagniatania  $F_i (i=1,2,3)$  można obliczyć z zależności:

$$F_i = \sum_{k=0}^{\rho_0-1} F_{ik}^P, \quad (2)$$

gdzie,  $F_{ik}^P$  jest składową siłą nagniatania przypadającą na nierówność  $k$  przedmiotu, w położeniu  $P$  narzędzia,  $\rho_0$  jest liczbą nierówności odkształczanych plastycznie.



Rys. 2. Siły nagniatania

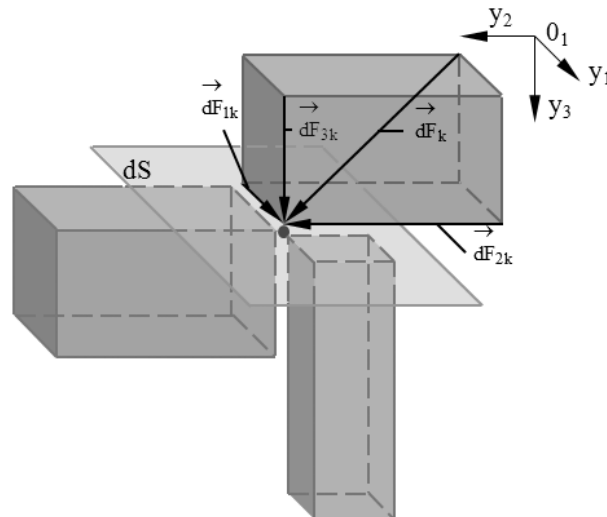
Siłę  $F_{ik}^P$  opisują zależności:

$$F_{ik}^P = \iint_{\Sigma_k^P} dF_{ik}^P = \iint_{\Omega_{ik}^P} dF_k^P = \iint_{\Omega_{ik}^P} \frac{dF_{ik}^P}{b_i} = \iint_{\Omega_{ik}^P} \frac{q_{ik}^P}{b_i} d\Omega_{ik}^P = \iint_{\Omega_{ik}^P} q_k^P d\Omega_{ik}^P, \quad (3)$$

gdzie  $b_i = \cos(N_k^P, y_i)$  jest cosinusem kierunkowym elementarnej powierzchni  $dS$ ,  $dF$  jest elementarną siłą działającą na powierzchnię  $dS$ ,  $dF_i$  są składowymi siły  $dF_i$  (rys. 3),  $q_k^P$  jest jednostkową siłą wypadkową obciążenia nierówności w rozpatrywanym punkcie,  $\Omega_{ik}^P$  jest rzutem obszaru  $\Sigma_k^P$  na płaszczyznę  $y_1 y_2$ ,  $\Sigma_k^P$  obszar kontaktu narzędzia z przedmiotem.

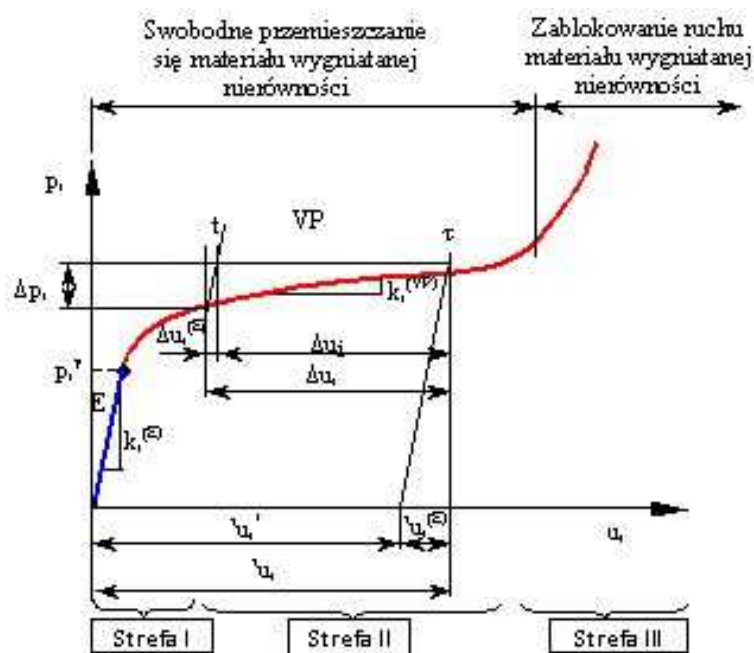
Obliczenie składowych siły nagniatania ze wzoru (3) możliwe jest jedynie dla przypadku, gdy materiał przedmiotu może być traktowany jako ciało idealnie sztywno-plastyczne. Dla innych przypadków, gdy materiał umacnia się, analityczne obliczenie całek we wzorze (3) jest niemożliwe. Wówczas wartość głównej siły nagniatania oblicza się numerycznie.

W pracy podjęto próbę oszacowania wartości i rozkładu nacisków w strefie kontaktu dla przypadku wygniatania regularnych nierówności. Naciski kontaktowe powodują przemieszczenie brzegu ciał będących w kontakcie. Wartość tego przemieszczenia uzależniona jest od tzw. sztywności kontaktowej, którą określa się stosunkiem siły działającej na powierzchnię do wartości przemieszczenia się powierzchni kontaktu w kierunku działania siły. Rozróżnia się sztywność kontaktową normalną i styczną. Zależność siły jednostkowej – przemie-



Rys. 3. Siły obciążające elementarną powierzchnię  $dS$

szczenie ( $p_i - u_i$ ) aproksymować można za pomocą dwóch linii (rys. 4). Pierwsza dotyczy zakresu liniowych przemieszczeń odwracalnych do granicy plastyczności  $p_i^y$  (zakres E), natomiast druga obejmuje nieliniowe przemieszczenia trwałe (zakres VP). Podczas procesu wygniatania występują również trzy główne strefy różniące się od siebie tendencją zmian nacisków. W strefie pierwszej, naciski gwałtownie wzrastają aż do chwili, gdy materiał osiągnie stan uplastycznienia oraz nastąpi ustabilizowanie zjawiska tarcia w strefie kontaktu. W strefie drugiej występują dużo mniejsze zmiany wartości nacisków. Natomiast w strefie trzeciej powtórnie następuje gwałtowny wzrost nacisków kontaktowych. Strefa trzecia występuje jedynie wówczas, gdy zachodzi blokowanie swobodnego ruchu materiału obrabianego. Zjawisko takie może wystąpić w przypadku nagniatania powierzchni chropowatej lub procesu plastycznego kształtowania gwintów (wewnętrznych jak i zewnętrznych). W takich przypadkach jest to głównie spowodowane niewłaściwym doбором luzów pomiędzy narzędziem a przedmiotem, co w rezultacie może prowadzić do zniszczenia narzędzi i materiału obrabianego.

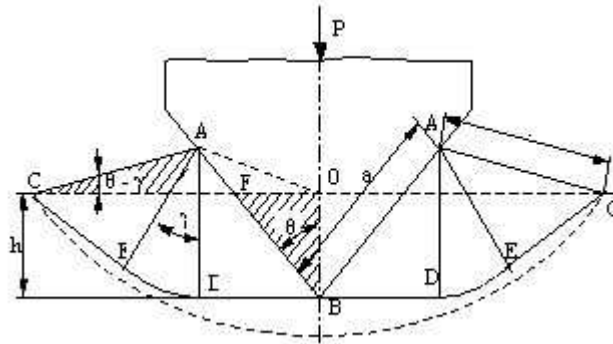


Rys. 4. Wykres  $p_i = f(u_i)$  dla kontaktu narzędzia z przedmiotem podczas wygniatania regularnych nierówności powierzchni

### 3. ANALIZA NACISKÓW KONTAKTOWYCH

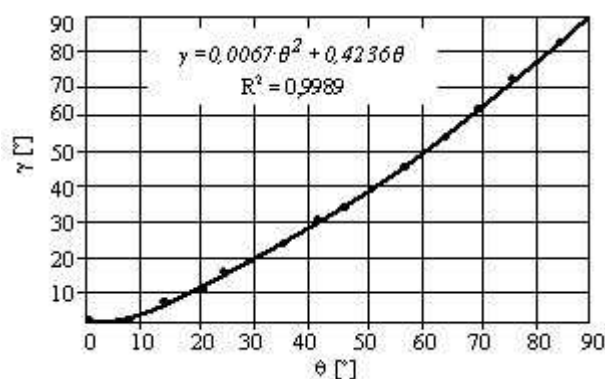
#### 3.1. Analiza teoretyczna

Rozważany jest klin o kącie wierzchołkowym  $2\theta = 90^\circ$  wciskany w ośrodek plastyczny (rys. 5). Rozwiązanie analityczne zagadnienia przeprowadzono za pomocą płaszczyzny jednostkowej w oparciu o metodę charakterystyk [14-17].



Rys. 5. Schemat odkształceń materiału podczas wciskania sztywnego klina

Zależności (6) i (6a) są tożsame. Na podstawie zależności (3) można sądzić, że kąt  $\gamma$  zależy jedynie od wierzchołkowego kąta klina  $\theta$ . Dla celów inżynierskich warto wyznaczyć funkcję  $\gamma = f(\theta)$ , na podstawie której można obliczyć wartość kąta  $\gamma$  (rys. 6).



Rys. 6. Wykres zależności  $\gamma = f(\theta)$  dla wciskania klina w ośrodek plastyczny

Wartość nacisków w strefie kontaktu wyznaczono z zależności:

$$p = 2k(1 + \gamma), \quad (7)$$

zaś siłę niezbędną do wciśnięcia klina z zależności:

$$P = 4 \cdot k \cdot a \cdot s \cdot (1 + \gamma) \cdot \sin\theta, \quad (8)$$

gdzie  $s$  jest szerokością klina.

Wartość  $k$  we wzorze (8) oblicza się dwoma metodami.

#### Metoda I

W rozwiązaniu znanym z literatury [13-15] przyjęto, że  $k$  jest opisane wzorem:

$$k = \frac{R_e}{\sqrt{3}}, \quad (9)$$

przy czym,  $R_e$  jest granicą plastyczności materiału. Wówczas nacisk  $p_n$  jest stały na długości kontaktu czyli  $p_n = p = \text{const.}$  oraz zależy jedynie od geometrii klina i granicy plastyczności materiału. Natomiast nie zależy od stopnia zawansowania procesu deformacji i od odległości od osi symetrii nierówności. Rozwiązanie to jest zasadne jedynie dla materiałów idealnie sztywno-plastycznych, bez umocnienia.



### Metoda II

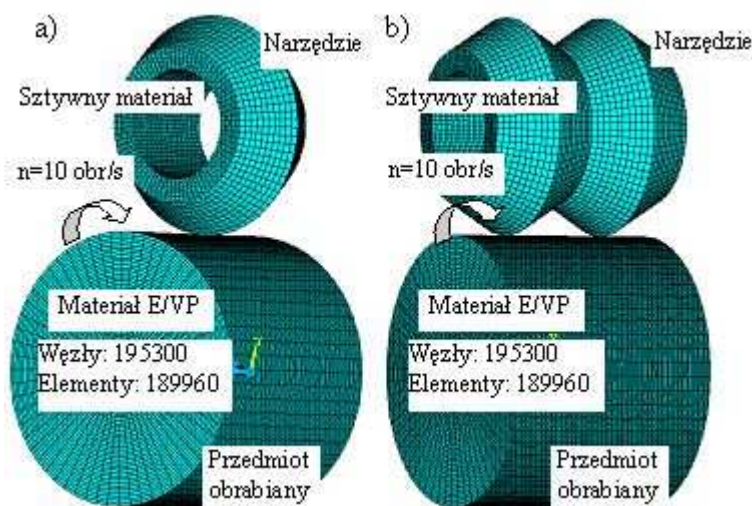
W drugim rozwiązaniu, do wyznaczenia  $k$ , przyjęto nieliniowy warunek plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego, który dla materiału umacniającego się wynosi:

$$k = \frac{\sigma_p(\varepsilon_i)}{\sqrt{3}}, \quad (10)$$

gdzie  $\sigma_p(\varepsilon_i) = R_p(\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^n$  jest naprężeniem uplastyczniającym materiał, zależny od intensywności odkształceń. Wówczas nacisk  $p_n$  zależy od geometrii klina i początkowej granicy plastyczności materiału, umocnienia materiału oraz stopnia zaawansowania procesu. Rozwiązanie to jest rozwiązaniem dokładniejszym od Metody I, jednakże również posiada ograniczone zastosowanie w praktyce inżynierskiej ze względu na często występujące złożone obszary kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym (z reguły krzywoliniowe) oraz nie uwzględniania możliwości blokowania się wypływek materiału. Lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie Metody Elementu Skończonego do analizy rozkładu nacisków kontaktowych w procesach obróbki plastycznej.

### 3.2. Analiza numeryczna

W celu analizy nacisków w strefie kontaktu podczas wygniataania regularnych nierówności opracowano dwa modele komputerowe procesu z zastosowaniem Metody Elementu Skończonego. Model pierwszy stanowi najprostszy sposób kształtowania regularnych nierówności, gdzie nie występuje zjawisko blokowania się swobodnego przemieszczania materiału kształtowanych nierówności. W modelu drugim uwzględniono również przypadek blokowania się swobodnego przemieszczania materiału kształtowanych nierówności (rys. 7).

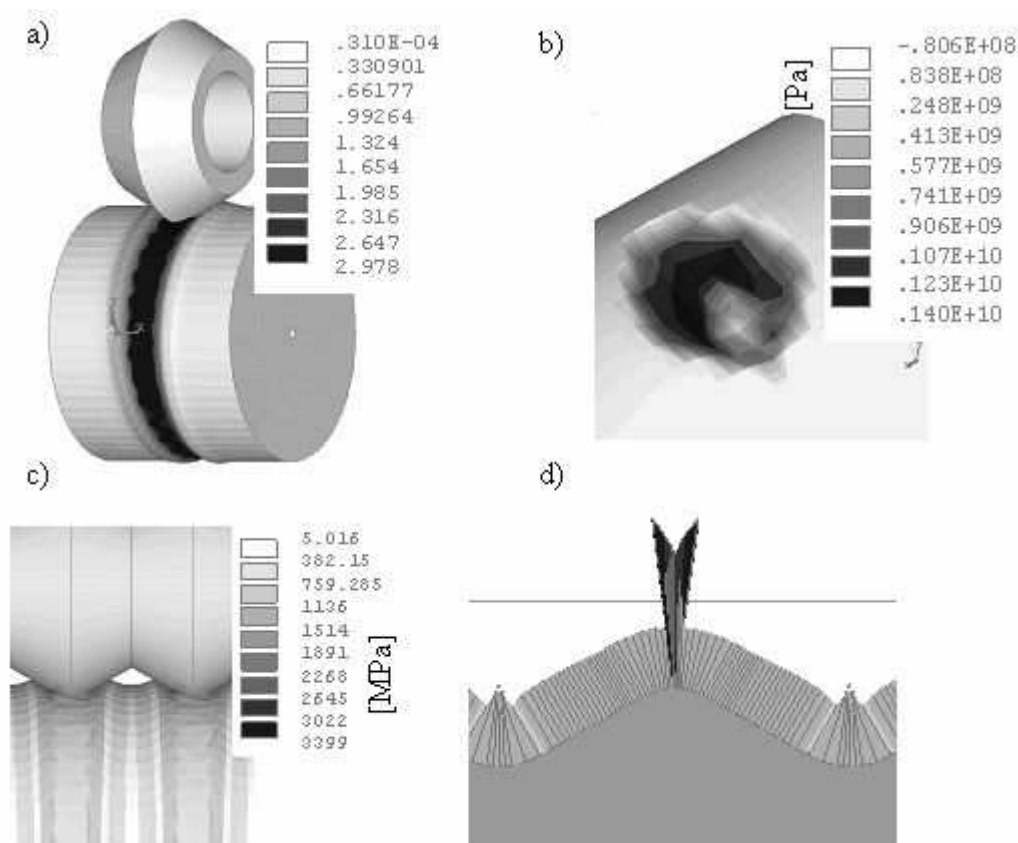


Rys. 7. Komputerowe modele procesu wygniataania regularnych nierówności a) model I, b) model II

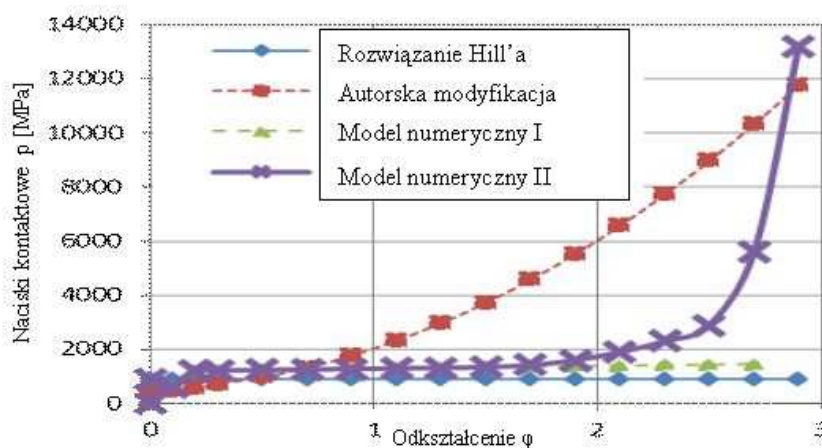
W każdym analizowanym modelu kąt wierzchołkowy klina narzędzia (w przekroju osiowym) wynosił  $2\theta = 120^\circ$ , naprężenie uplastyczniające materiału przedmiotu  $\sigma_p = 420$  MPa, natomiast współczynnik umocnienia  $E_T = 500$  MPa.

Przykładowe wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 8.

Wyniki wszystkich wykonanych analiz przedstawiono na wykresie (rys. 9).



Rys. 8. Przykładowe wyniki symulacji: a) stan odkształceń dla modelu I, b) stan nacisków kontaktowych dla modelu I, c) stan naprężeń dla modelu II, d) stan nacisków kontaktowych dla modelu II



Rys. 9. Zmienność nacisków kontaktowych w funkcji odkształceń dla rozwiązań teoretycznych i numerycznych

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych analiz można wyciągnąć następujące wnioski:

- 1) Opracowana nowa technologia gładkościowo-umacniającego nagniatania tocznego typu duplex wymaga wielu analiz. Szczególnie ważne są wyniki analiz opisujące jakościowy i ilościowy wpływ parametrów technologicznych procesu na szeroko pojętą jakość technologiczną i użytkową wyrobów.
- 2) Analiza teoretyczna procesu nagniatania typu duplex umożliwia analizę nacisków w strefie kontaktu, jednakże znane w literaturze [13-16] rozwiązanie ma ograniczone zastosowanie i może być skutecznie stosowane jedynie dla przypadków obróbki materiałów nie wykazujących umocnienia oraz dla przypadku jedynie swobodnego przemieszczania się materiału.

- 3) Przedstawione autorskie rozwiązanie teoretyczne (modyfikacja rozwiązania Hill'a) może być stosowane dla materiałów umacniających się, jednakże w zakresie niezbyt dużych odkształceń plastycznych oraz dla przypadków swobodnego przemieszczania się materiału.
- 4) Przedstawiona autorska aplikacja numeryczna umożliwi analizę procesu nagniatania duplex w sposób kompleksowy. Uzyskane wyniki symulacji wykazują lepszą zgodność z wynikami eksperymentalnymi w stosunku do rozwiązań teoretycznych i mogą znaleźć zastosowanie w praktyce inżynierskiej. Rozwiązania te mogą się wydatnie przyczynić do optymalizacji konstrukcji narzędzi w celu zmniejszenia oraz równomiernego rozłożenia nacisków w strefie kontaktu, co wydatnie poprawi ich trwałość.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*, Warszawa, WNT 1987.
- [2] Kukielka L.: *Theoretical and experimental foundations of surface roller burnishing with the electrocontact heating*, Book of Mechanical Engineering. Technical University of Koszalin No 47, Koszalin 1994, pp. 348.
- [3] Patyk R., Kukielka L. 2009. *Prognozowanie wytrzymałości zmęczeniowej zęba kultywatora z wykorzystaniem metod numerycznych*. Inżynieria Rolnicza. Nr 9 (118).
- [4] Legutko S., Nosal S.: *Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej części maszyn*, Poznań, Ośrodek Wydawnictw Naukowych 2004.
- [5] Patyk R.: *New method of technological surface layer shaping of machine parts during duplex burnishing rolling process*. Steel Research International, Special Edition: 14th International Conference on Metal Forming, 2012, pp. 115 - 117.
- [6] Kulakowska A.: *Problems of surface preparation under burnishing rolling in aspect of product quality*. Steel Research International vol. 81/9, 2010, pp. 218-221.
- [7] Patyk R.: *Theoretical and experimental basis of regular asperities about triangular outline embossing technology*. Steel Research International vol. 81/9, 2010.
- [8] Patyk R., Kukielka L.: *Optimization of geometrical parameters of regular triangular asperities of surface put to smooth burnishing*. Steel Research International vol. 2, 2008.
- [9] Patyk S., Patyk R., Kukielka L.: *Analiza sił w procesie nagniatania tocznego powierzchni chropowatych*. Materiały konferencyjne TON 2008, Gdańsk 2008
- [10] Patyk S.: *Analiza sił nagniatania tocznego powierzchni chropowatych o trójkątnym zarysie nierówności*. Rozprawa doktorska (w przygotowaniu).
- [11] Kulakowska A.: *Experimental researches of burnishing rolling process of regular surface asperities prepared in turning process*. Steel Research International. Special Edition: 14<sup>th</sup> International Conference on Metal Forming, 2012, pp. 127-131.
- [12] Kukielka L., Kulakowska A., Patyk R.: *Numerical analysis of embossing process of regular inequalities with triangular outline on cylindrical semi product*, Journal of Systemics, Vol. 8/3, Cybernetics and Informatics 2010, pp. 36-41.
- [13] 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 vol. 2, 2008, pp. 42-48.
- [14] Hill R.: *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford At The Clarendon Press 1986.
- [15] Johnson K. L.: *Contact mechanics*. Cambridge University Press 1985.
- [16] Szczepiński W.: *Introduction to analysis of plastic formation processing*. PWN, Wa-wa, 1967.
- [17] Szczepiński W.: *Mechanics of plastic flow*. PWN, Warszawa, 1978.