

*analiza numeryczna, nagniatanie, Metoda Elementów Skończonych, chropowatość powierzchni,
symulacja komputerowa, parametry procesu nagniatania, odkształcenie sprężyste,
odchyłki wysokości nierówności, głębokość nagniatania*

Agnieszka KUŁAKOWSKA¹

Radosław PATYK²

WYBRANE ASPEKTY OBRÓBKİ NAGNIATANIEM CZĘŚCI SAMOCHODOWYCH

W pracy analizie poddano zmiany wymiarowe zachodzące po procesie nagniatania związane z przemieszczeniem materiału po odciążeniu, a co za tym idzie zwiększeniem wysokości nierówności. Uzyskano wyniki korzystając z nowoczesnych narzędzi obliczeniowych wykorzystujących Metodę Elementów Skończonych. Opracowano aplikację w języku APDL. Wykonano symulacje komputerowe w programie Ansys. Uzyskano wyniki zależności niekontrolowanej zmiany wymiarów wysokości nierówności od głębokości nagniatania oraz od odchyłki zarysu nierówności powierzchni. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów.

CHOOSEN ASPECTS OF BURNISHING ROLLING PROCESS OF CAR PARTS

In the paper the changes of measurement after burnishing rolling process connected with elastic strains which cause increase of asperities height. One received results using modern calculation tools basing on Finite Elements Method. Application in APDL language was elaborated. Computer simulation in Ansys programm were made. One received results of dependence of asperities height uncontrolled change measurement from depth of burnishing and height deviation of asperity. Results as graphs are presented.

1. WSTĘP

Podczas obróbki wykańczającej kształtowane są ostatecznie podstawowe właściwości użytkowe warstwy wierzchniej. W określonych warunkach eksploatacji właściwości te, mają decydujący wpływ na trwałość i niezawodność maszyn. Jedną z metod obróbki wykańczającej, która umożliwia otrzymanie WW charakteryzującej się korzystnymi właściwościami użytkowymi, jest obróbka nagniataniem [1÷4]. Jest to jedna z metod obróbki wykańczającej metali i ich stopów, spieków oraz tworzyw sztucznych, polegająca na wykorzystaniu miejscowego odkształcenia plastycznego, wytwarzanego w warstwie wierzchniej przedmiotu [4], wskutek określonego (siłowego oraz kinematycznego) współdziałania twardego i gładkiego narzędzia (o kształcie kuli, krążka, wałka lub innym) z powierzchnią obrabianą [4]. Efektem nagniatania jest zmniejszenie chropowatości

¹Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, agnieszka.kulakowska@tu.koszalin.pl

²Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, radoslaw.patyk@tu.koszalin.pl

powierzchni przy jednoczesnym utwardzeniu warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu oraz kształtowanie w niej naprężeń ściskających. Niektóre sposoby obróbki nagniataniem mogą być stosowane w celu wytworzenia mikrorowków smarnych na powierzchniach współpracujących w warunkach tarcia, np.: czopów, panewek, prowadnic, cylindrów, tłoków, sprawdzianów i in., w celu podwyższenia ich odporności na zatarcie i zużycie ściernie.

Wymagania odnośnie stanu warstwy wierzchniej i dokładności wymiarowo-kształtowej są zróżnicowane, a związane jest to z różnorodnością przeznaczenia części oraz różnorodnością warunków ich eksploatacji.

W procesie nagniatania występuje jednocześnie kilka współdziałających ze sobą procesów, zjawiska zachodzące w strefach odkształceń materiału oddziałują na zjawiska w obszarach kontaktu, a te, na niektóre warunki nagniatania, co również wpływa na jego złożoność. Trudność sprawia również ustalenie parametrów nagniatania dla uzyskania wymaganej jakości, ponieważ pomiar parametrów procesu (decydujących o jakości technologicznej takich jak: pola temperatur, pola naprężeń, przemiany strukturalne, zmiana wymiarów pod wpływem odkształceń sprężystych, itp.) w trakcie procesu nagniatania, przy obecnym stanie techniki jest niemożliwy. O przebiegu parametrów można tylko wnioskować na podstawie właściwości wyrobu po procesie.

W wyniku nagniatania, występują zmiany wymiarowe spowodowane następującymi czynnikami:

- a) odkształceniem plastycznym i zmniejszeniem nierówności powierzchni,
- b) zagęszczeniem i zgniotem struktury,
- c) wydłużeniem osiowym przedmiotu obrabianego w wyniku odkształceń plastycznych i naprężeń własnych wytworzonych w warstwie wierzchniej [4],
- d) przemieszczeniem materiału po odciążeniu i zwiększeniem wysokości nierówności.

W pracy analizie poddano zmiany wymiarowe zachodzące po procesie nagniatania związane z przemieszczeniem materiału po odciążeniu, a co za tym idzie zwiększeniem wysokości nierówności. Uzyskano wyniki korzystając z nowoczesnych narzędzi obliczeniowych wykorzystujących Metodę Elementów Skończonych. Opracowano aplikację w języku APDL. Wykonano symulacje komputerowe w programie Ansys. Uzyskano wyniki zależności niekontrolowanej zmiany wymiarów wysokości nierówności od głębokości nagniatania oraz od odchyłki zarysu nierówności powierzchni. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów.

2. STOSOWANA METODA ROZWIĄZANIA

Proces nagniatania naporowego tocznego rozpatrzono jako geometrycznie i fizycznie nieliniowe zagadnienie brzegowo-początkowe, z nieznanymi warunkami brzegowymi w obszarze kontaktu. Do opisu zjawisk nieliniowych, na typowym kroku przyrostowym, wykorzystano uaktualniony opis Lagrange'a. Przyrosty odkształceń i naprężeń opisano odpowiednio przyrostem nieliniowego tensora odkształceń Greena – Lagrange'a i przyrostem drugiego symetrycznego tensora naprężeń Pioli – Kirchhoffa [5].

Ogólne równanie ruchu obiektu ma postać:

$$\begin{aligned}
& [{}^t\mathbf{M}]\{{}^\tau\Delta\ddot{\mathbf{r}}\} + [{}^t\mathbf{C}_T(\cdot)]\{{}^\tau\Delta\dot{\mathbf{r}}\} + ([{}^t\mathbf{K}_T(\cdot)] + [{}^\tau\Delta\mathbf{K}_T(\cdot)])\{{}^\tau\Delta\mathbf{r}\} = \\
& = \{{}^\tau\Delta\mathbf{R}_T(\cdot)\} + \{{}^\tau\Delta\mathbf{F}(\cdot)\} + \{{}^t\mathbf{F}_T(\cdot)\},
\end{aligned} \tag{1}$$

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 ,
- $[{}^\tau\Delta\mathbf{K}_T]$ - globalna macierz przyrostu sztywności obiektu na kroku,
- $\{{}^t\mathbf{F}_T\}$ - globalny wektor obciążeń wewnętrznych obiektu w chwili t ,
- $\{{}^\tau\Delta\mathbf{F}\}$ - wektor przyrostu obciążeń wewnętrznych obiektu,
- $\{{}^\tau\Delta\mathbf{R}_T\}$ - globalny wektor przyrostu obciążeń zewnętrznych obiektu,
- $\{{}^\tau\Delta\mathbf{r}\}$ - wektor przyrostu przemieszczeń węzłów obiektu,
- $\{{}^\tau\Delta\dot{\mathbf{r}}\}$ - wektor przyrostu prędkości węzłów obiektu,
- $\{{}^\tau\Delta\ddot{\mathbf{r}}\}$ - wektor przyrostu przyspieszeń węzłów obiektu.

Układ równań (1) zawiera N równań, w których występuje $4N$ niewiadomych tj. składowych wektorów: przyrostu przemieszczeń węzłów $\{{}^\tau\Delta\mathbf{r}\}$, przyrostu prędkości węzłów $\{{}^\tau\Delta\dot{\mathbf{r}}\}$, przyrostu przyspieszeń węzłów $\{{}^\tau\Delta\ddot{\mathbf{r}}\}$, przyrostu obciążeń wewnętrznych obiektu $\{{}^\tau\Delta\mathbf{F}\}$ oraz N^2 niewiadomych elementów macierzy przyrostu sztywności obiektu $[{}^\tau\Delta\mathbf{K}_T]$. Zakłada się dalej, iż elementy wektora $\{{}^\tau\Delta\mathbf{F}\}$ oraz macierzy $[{}^\tau\Delta\mathbf{K}_T]$ są znane z poprzedniej iteracji. Zatem układ równań zawiera $3N$ niewiadomych. Analityczne rozwiązanie tego równania jest niemożliwe ze względu na nadmiar niewiadomych. Możliwe jest jedynie rozwiązanie przybliżone poprzez zmniejszenie liczby występujących w nim zmiennych. Wśród podstawowych podejść stosowanych do przybliżonego rozwiązywania tych równań wyróżnia się grupę metod aproksymacyjnych, zwanych metodami bezpośredniego całkowania [6÷8]. Ze względu na wymaganą dokładność rozwiązania pokazano zastosowanie metody Newmarka i metody Wilsona. W metodzie Newmarka w celu zapewnienia zbieżności przyjęto następujące wartości stałych: $\delta = 0,5$ oraz $\alpha = 0,25$. Zastosowano następujące równania aproksymacyjne:

$$\begin{aligned}
\{{}^\tau\ddot{\mathbf{r}}\} &= [\{{}^\tau\Delta\mathbf{r}\} - \{{}^t\dot{\mathbf{r}}\}\Delta t - \Delta t^2(0,5 - \alpha)\{{}^t\ddot{\mathbf{r}}\}]/(\alpha\Delta t^2), \\
\{{}^\tau\dot{\mathbf{r}}\} &= \delta\{{}^\tau\Delta\mathbf{r}\}/(\alpha\Delta t) + (1 - \delta/\alpha)\{{}^t\dot{\mathbf{r}}\} + \Delta t(1 - 0,5\delta/\alpha)\{{}^t\ddot{\mathbf{r}}\},
\end{aligned} \tag{2a}$$

lub

$$\begin{aligned}
\{{}^\tau\ddot{\mathbf{r}}\} &= a_0\{{}^\tau\Delta\mathbf{r}\} - a_2\{{}^t\dot{\mathbf{r}}\}\Delta t - a_3\{{}^t\ddot{\mathbf{r}}\}, \\
\{{}^\tau\dot{\mathbf{r}}\} &= a_1\{{}^\tau\Delta\mathbf{r}\} - a_4\{{}^t\dot{\mathbf{r}}\} - a_5\{{}^t\ddot{\mathbf{r}}\},
\end{aligned} \tag{2b}$$

w których:

$a_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2}$, $a_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t}$, $a_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}$, $a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$, $a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1$, $a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right)$, są stałymi całkowania, otrzymując:

$$([{}^t_t \tilde{\mathbf{K}}_T] + [{}^t_t \Delta \mathbf{K}_T]) \{ {}^t_t \Delta \mathbf{r} \} = \{ {}^t_t \Delta \mathbf{R} \} + \{ {}^t_t \Delta \mathbf{F} \} + \{ {}^t_t \tilde{\mathbf{F}}_T \}, \quad (3)$$

gdzie:

$$[{}^t_t \tilde{\mathbf{K}}_T] = [{}^t_t \mathbf{K}_T] + a_0 [{}^t_t \mathbf{M}] + a_1 [{}^t_t \mathbf{C}_T], \quad (4)$$

$$\{ {}^t_t \tilde{\mathbf{F}}_T \} = \{ {}^t_t \mathbf{F}_T \} + [a_2 [{}^t_t \mathbf{M}] + (a_4 + 1) [{}^t_t \mathbf{C}_T]] \{ {}^t_t \dot{\mathbf{r}} \} + [(a_3 + 1) [{}^t_t \mathbf{M}] + a_5 [{}^t_t \mathbf{C}_T]] \{ {}^t_t \ddot{\mathbf{r}} \}. \quad (5)$$

W przypadku metody Wilsona (metoda parametru ϑ), która jest metodą całkowania niejawnego, stosuje się następujące równania aproksymacyjne:

$$\{ {}^t_t \ddot{\mathbf{r}} \} = \frac{6}{\vartheta^2 (\Delta t)^2} \{ {}^t_t \Delta \mathbf{r} \} - \frac{6}{\vartheta \Delta t} \{ {}^t_t \dot{\mathbf{r}} \} - 2 \{ {}^t_t \ddot{\mathbf{r}} \}, \quad (6)$$

$$\{ {}^t_t \dot{\mathbf{r}} \} = \frac{3}{\vartheta \Delta t} \{ {}^t_t \Delta \mathbf{r} \} - 2 \{ {}^t_t \dot{\mathbf{r}} \} - \frac{\vartheta \Delta t}{2} \{ {}^t_t \ddot{\mathbf{r}} \},$$

lub

$$\begin{aligned} \{ {}^t_t \ddot{\mathbf{r}} \} &= a_0 \{ {}^t_t \Delta \mathbf{r} \} - a_2 \{ {}^t_t \dot{\mathbf{r}} \} - 2 \{ {}^t_t \ddot{\mathbf{r}} \}, \\ \{ {}^t_t \dot{\mathbf{r}} \} &= a_1 \{ {}^t_t \Delta \mathbf{r} \} - 2 \{ {}^t_t \dot{\mathbf{r}} \} - a_3 \{ {}^t_t \ddot{\mathbf{r}} \}, \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie:

$$a_0 = \frac{6}{\vartheta^2 (\Delta t)^2}, \quad a_1 = \frac{3}{\vartheta \Delta t}, \quad a_2 = 2a_1, \quad a_3 = \frac{\vartheta \Delta t}{2}, \text{ są stałymi całkowania.}$$

Metoda Wilsona jest bezwarunkowo stabilna dla $\vartheta \geq 1,37$. W niniejszej pracy przyjęto $\vartheta = 1,4$. Po podstawieniu wzorów (6) do równań (2), po odpowiednich przekształceniach otrzymuje się:

$$([{}^t_t \tilde{\mathbf{K}}_T] + [{}^t_t \Delta \mathbf{K}_T]) \{ {}^t_t \Delta \mathbf{r} \} = \{ {}^t_t \Delta \mathbf{R} \} + \{ {}^t_t \Delta \mathbf{F} \} + \{ {}^t_t \tilde{\mathbf{F}}_T \}, \quad (8)$$

gdzie:

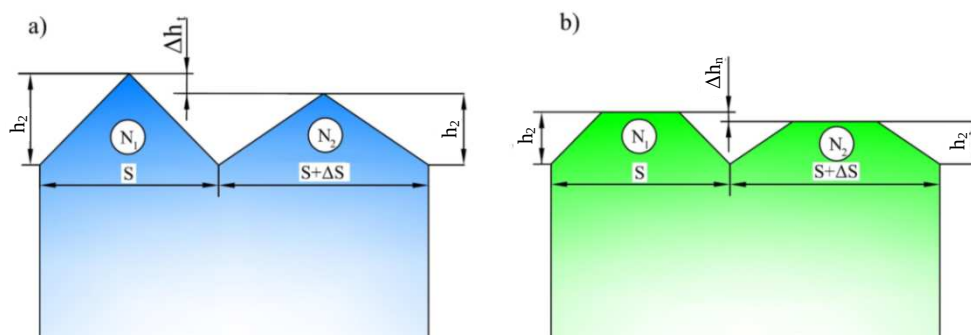
$$[{}^t_t \tilde{\mathbf{K}}_T] = [{}^t_t \mathbf{K}_T] + a_0 [{}^t_t \mathbf{M}] + a_1 [{}^t_t \mathbf{C}_T], \quad (9)$$

$$\{ {}^t_t \tilde{\mathbf{F}}_T \} = \{ {}^t_t \mathbf{F}_T \} + (3 [{}^t_t \mathbf{C}_T] + a_2 [{}^t_t \mathbf{M}]) \{ {}^t_t \dot{\mathbf{r}} \} + (3 [{}^t_t \mathbf{M}] + a_5 [{}^t_t \mathbf{C}_T]) \{ {}^t_t \ddot{\mathbf{r}} \}. \quad (10)$$

3. ZAKRES I METODYKA SYMULACJI KOMPUTEROWYCH

Symulacje komputerowe wykonano za pomocą programu Ansys w wersji 11.0 [9]. Analizie poddano dwie nierówności o kącie wierzchołkowym $\theta = 90^\circ$ (rys. 1). Pierwsza z nich (N1) miała stałą wysokość i odstęp, w przypadku drugiej nierówności (N2) zarówno

jej wysokość jak i szerokość można dowolnie zmieniać. Różnicę wysokości nierówności po toczeniu między pierwszą a drugą nierównością nazwano odchyłką wysokości nierówności po obróbce poprzedzającej (toczeniu) Δh_t . Różnicę wysokości nierówności po nagniataniu między N_1 a N_2 nazwano odchyłką wysokości nierówności po nagniataniu Δh_n .

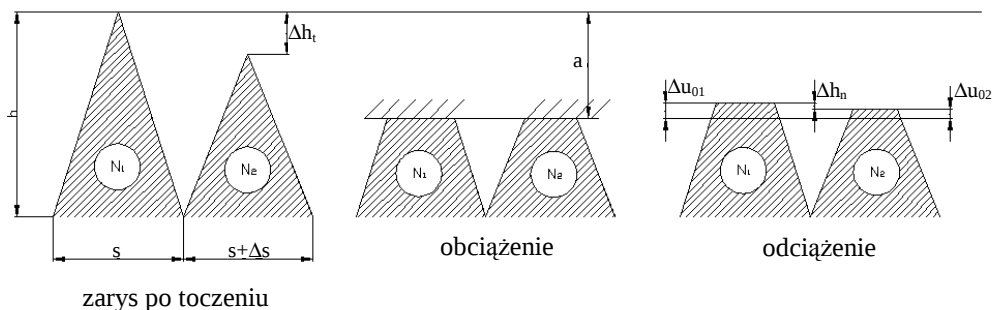


Rys. 1. Definicja odchyłki wysokości nierówności: a) po obróbce poprzedzającej (toczeniu), b) po nagniataniu

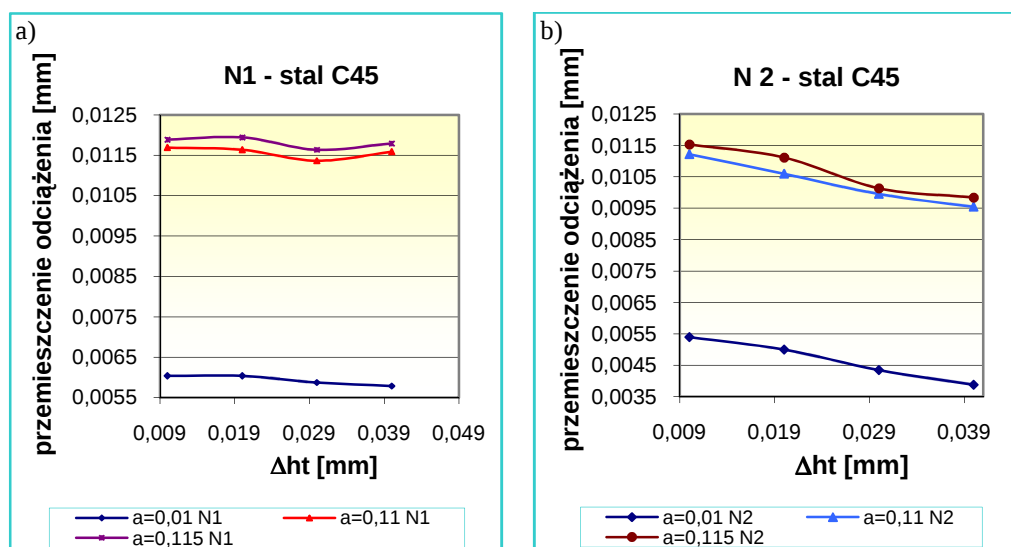
Nierówności nagniatano na trzy różne głębokości: $a_n=0,01$, $a_n=0,11$ i $a_n=0,15$ [mm]. Przyjęto zakres odchyłek wysokości nierówności po toczeniu $\Delta h_t=0,01 \div 0,04$ [mm]. Obiekt podzielono na elementy skończone, które zagęszczono w strefie kontaktu. Ważne jest, aby siatka była dostatecznie gęsta, gdyż będzie to rzutować na późniejsze wyniki obliczeń numerycznych. W rozpatrywanym przypadku zastosowano siatkę o polach prostokątnych (narzędzie nagniatające) oraz nieregularną (materiał obrabiany). Na narzędzie nagniatające zadano przemieszczenie w głąb materiału na kierunku osi Y zgodnie z przyjętymi do analizy głębokościami. Przyjęto model materiałowy dla stali C45 oraz stali 10, gęstość materiału $\rho = 7800$ [kg/m³], moduł Younga $E = 210$ [GPa], liczba Poissona $\nu = 0,29$. Przyjęto, że narzędzie nagniatające jest ciałem nieodkształcalnym $E \rightarrow \infty$.

4. WYNIKI ANALIZ NUMERYCZNYCH

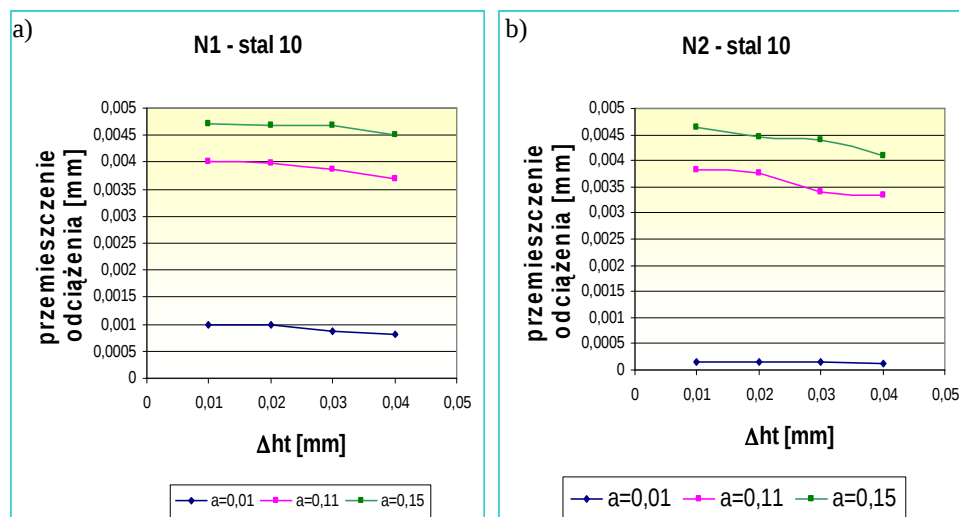
Różnica położenia zarysu w obu krokach jest przemieszczeniem odciążenia Δu_0 (rys. 2). Wykresy zależności przemieszczenia odciążenia pierwszej Δu_1 i drugiej Δu_2 nierówności od odchyłki wysokości Δh_t dla przykładowych głębokości nagniatania przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



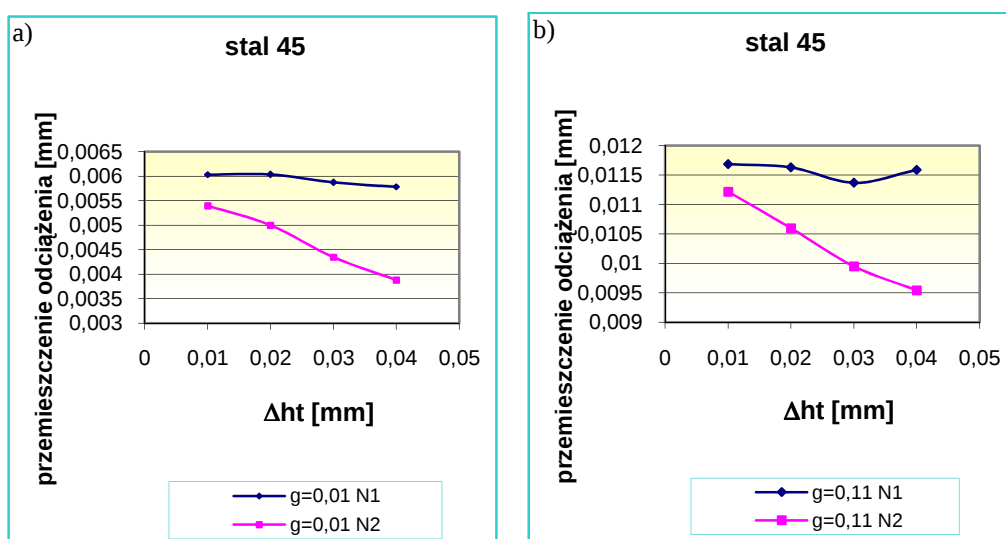
Rys. 2. Definicja przemieszczenia odciążenia



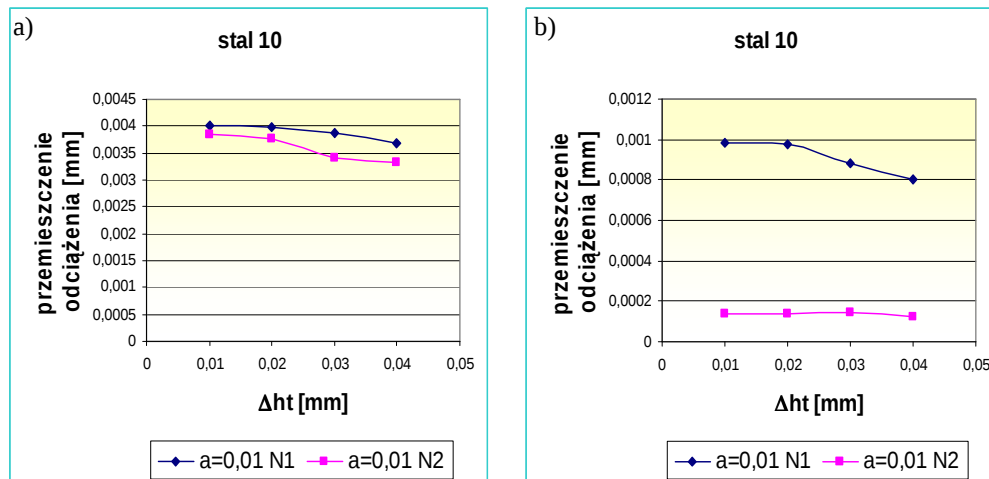
Rys. 3. Wykres zależności przemieszczenia odciążenia materiału w zależności od odchyłki wysokości nierówności po toczeniu, dla różnych głębokości i stali: stal 45 – nierówność N1 (a) i nierówność N2 (b)



Rys. 4. Wykres zależności przemieszczenia odciążenia materiału w zależności od odchyłki wysokości nierówności po toczeniu, dla różnych głębokości i stali: stal 10 – nierówność N1 (a) i nierówność N2(b)



Rys. 5. Wykres zależności przemieszczenia odciążenia materiału nierówności N1 i N2 w zależności od odchyłki wysokości nierówności po toczeniu dla głębokości: (a) - 0,01 [mm], (b) - 0,11 [mm] dla stali 45



Rys. 6. Wykres zależności przemieszczenia odciążenia materiału nierówności N1 i N2 w zależności od odchyłki wysokości nierówności po toczeniu dla głębokości: (a) - 0,01 [mm], (b) - 0,11 [mm] dla stali 10.

8. WNIOSKI

Na podstawie symulacji komputerowych określono wartości przemieszczenia odciążenia po nagniataniu powierzchni o trójkątnym zarysie nierówności. Zauważono że wraz ze wzrostem odchyłek wysokości nierówności powierzchni, zarówno w przypadku stali C45 oraz stali 10, przemieszczenie odciążenia maleje. Uzyskane wyniki wskazują również, że wraz ze wzrostem głębokości nagniatania przemieszczenie odciążenia rośnie. Porównując wartości przemieszczenia odciążenia dla nierówności o stałej geometrii (N1) i zmiennej geometrii (N2) zauważyć można, że uzyskano wartości przemieszczenia większe dla nierówności N1.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Fic S.: *Doświadczalne i teoretyczne podstawy obróbki elektromechanicznej*, Warszawa, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej 1983.
- [2] Górski E.: *Obróbka gładkościowa*, Warszawa, WNT 1970.
- [3] Kozłowski M.M.: *Proces kształtowania powierzchni części maszyn nagniataniem naporowym tocznym*, Bydgoszcz, ATR seria Rozprawy nr 20, 1985.
- [4] Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*, Warszawa, WNT 1987.
- [5] Kułakowska A., Kukiłka L.: *Wpływ odchyłek zarysu regularnych nierówności powierzchni po obróbce toczeniem na wybrane właściwości warstwy wierzchniej wyrobu nagniatanego tocznie*, Warszawa, I Kongres Mechaniki Polskiej 2007 r.
- [6] Kleiber M.: *Wprowadzenie do metody elementów skończonych*. Materiały dla studiów doktoranckich i podyplomowych nr 9, , Poznań, Politechnika Poznańska 1984.
- [7] Bathe K.J., Wilson E.L.: *Numerical methods in finite Elements Analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1976.
- [8] Bathe K.J.: *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1982.