

NUMERYCZNA ANALIZA PROCESU NAGNIATAJĄCEGO PRZEPYCHANIA ŚLIZGOWEGO

THE NUMERICAL ANALYSIS OF THE BALLIZING PROCESS

Tomasz Dyl

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81–225 Gdynia, Wydział Mechaniczny,
Katedra Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów, e-mail: dylu@am.gdynia.pl

Streszczenie: Nagniatanie jest obróbką wykończeniową opartą na miejscowym odkształceniu plastycznym przedmiotu obrabianego, zachodzącym w warstwie wierzchniej, poprzez stykowe oddziaływanie twardego i gładkiego elementu nagniatającego (np. kulki) na powierzchnię obrabianą. Nagniatające przepychanie ślizgowe (NPS) polega na przepychaniu elementu nagniatającego, który ma większy wymiar niż otwór o wartość tzw. wcisku nagniatania, czyli różnicy wymiaru mierzonego w trzech płaszczyznach, przed obróbką i po nagniataniu. Do nagniatającego przepychania ślizgowego otworów w produkcji seryjnej i masowej stosuje się: kulki nagniatające, przepychacze trzpieniowe oraz wieloelementowe przeciągacze ślizgowe. W wyniku nagniatania w warstwie wierzchniej występują odkształcenia sprężyste i odkształcenia plastyczne. Oddziaływanie narzędzia nagniatającego na przedmiot obrabiany najczęściej jest modelowane z zastosowaniem rozwiązań dla ciał sprężystoplastycznych oraz sztywnoplastycznych. W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej procesu nagniatania metodą NPS. Określono sposób oddziaływania sztywnego narzędzia o określonej krzywiznie elementu nagniatającego na odkształcany przedmiot. Na styku elementu nagniatającego z wewnętrzną powierzchnią tulei ze stali niestopowej C45 określono stan odkształceń, wykorzystując program komercyjny FORGE®, oparty na metodzie elementów skończonych.

Słowa kluczowe: obróbka nagniataniem, nagniatające przepychanie ślizgowe (NPS), metoda elementów skończonych.

Abstract: Burnishing is finishing treatment, which uses local plastic deformation. Burnishing consists of hard and smooth operation of the tool (ball) in the surface. Ballizing process (BP) consists of pushing the tool through the opening, wherein the ball is greater in size than the opening of the value of the reduction ratio. The impact of the tool on the workpiece is usually modelled using solutions for the bodies of elastic-plastic and rigid-plastic. Modelling of the burnishing method of the NPS is to determine the impact of a rigid tool with a specific curvature of the deformed object. On the surface the balls contact with the inner surface of the non-alloy steel C45 tube was determined state of strain using commercial program FORGE® based on the finite element method.

Keywords: burnishing, ballizing process, finite element method.

1. WSTĘP

Nagniatające przepychanie ślizgowe (NPS) jest obróbką wykończeniową powierzchni walcowych wewnętrznych. Jako elementy nagniatające w procesie nagniatającego przepychania ślizgowego, w produkcji seryjnej i masowej używane są kulki nagniatające i przepychacze trzpieniowe. Ze względu na wpływ odkształcenia sprężystego przedmiotu wymiar maksymalny elementu przepychanego musi być większy od założonego wymiaru otworu o 0,05 mm. Wartość ta dobierana jest na podstawie danych eksperymentalnych [Przybylski 1987; Korzyński 2007; Dyl 2014].

Stosowane są również przeciągacze składane z wymiennymi pierścieniowymi elementami nagniatającymi oraz przeciągacze z ostrzami skrawającymi, służące do jednoczesnej obróbki otworów skrawaniem i nagniataniem z pominięciem ich poprzedniego dokładnego roztaczania [Przybylski 2005].

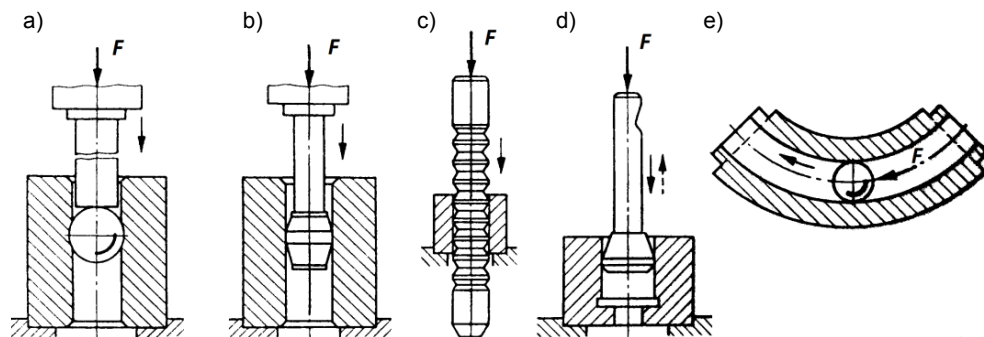
Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe narzędzia do obróbki nagniataniem metodą NPS [Przybylski 1987; Dyl 2014].

Nagniatające przepychanie ślizgowe (NPS) umożliwia poprawę parametrów geometrycznych otworu, zmniejszenie chropowatości powierzchni, zwiększenie twardości warstwy wierzchniej, ukonstytuowanie ściskających naprężeń własnych. Obróbka ta cechuje się dużą wydajnością, dość prostym oprzyrządowaniem technologicznym oraz możliwością obróbki otworów o osi nieprostoliniowej. Element nagniatający ma większy wymiar niż otwór o wartość wcisku. Wcisk nagniatania jest to różnica wymiaru narzędzia i wymiaru przedmiotu po obróbce poprzedzającej, określana jako średnia wartość pomiaru w trzech płaszczyznach. Jest on większy od naddatku obróbkowego, określanego jako różnica wymiaru przed i po obróbce nagniataniem, o wartość odkształceń sprężystych.

Dobór wcisku uwarunkowany jest parametrami takimi jak np.: konstrukcja narzędzia, właściwości wytrzymałościowe przedmiotu, wartość obrabianej średnicy.

Charakterystyczne dla przepychania jest występowanie tarcia ślizgowego między narzędziem a obrabianą powierzchnią.

Drugą charakterystyczną cechą tej obróbki jest to, że główna siła obróbki o kierunku normalnym do powierzchni występuje bezpośrednio w układzie narzędzie – przedmiot [Fattouh 1989; Wang, Blunt i Stout 1998; El-Abden, Abdel-Rahman i Mohamed 2002; Lipski i Zaleski 2004; Vorontsov 2007; Zaleski i Lipski 2011]. Oznacza to, że nie przenosi się ona bezpośrednio na maszynę (przeciągarkę, prasę). Siła przepychania skierowana jest stycznie do powierzchni obrabianej. Zadaniem tej siły jest pokonanie oporu tarcia oraz oporu odkształcenia.



Rys. 1. Przykładowe narzędzia do obróbki otworów nagniatającym przepychaniem ślizgowym: a) kulka łożyskowa; b) przepychacz trzpieniowy walcowo-czołowy; c) przepychacz wieloelementowy składany; d) przepychacz trzpieniowy do otworu nieprzelotowego; e) przepychanie otworu łukowego kulką łożyskową [Przybylski 1987; Dyl 2014]

Fig. 1. The examples of tools for burnishing the holes by ballizing of: a) ball bearing; b) a plunger pin-mill; c) plunger multi-fold; d) plunger pin into the blind hole; e) having pushed the hole arc with ball bearing [Przybylski 1987; Dyl 2014]

Nagniatające przepychanie ślizgowe stosowane jest do obróbki otworów o różnych przekrojach poprzecznych. Przedział wymiarów otworów zawiera wymiary od kilku do kilkudziesięciu milimetrów. Ścianka przedmiotu obrabianego powinna mieć grubość, która zabezpieczy przedmiot przed znacznym odkształceniem powierzchni zewnętrznej. Tego typu obróbkę stosuje się dla różnych materiałów (stali stopowej i stali niestopowej, żeliwa, brązów, mosiądzów, stopów tytanu i innych stopów metali nieżelaznych lekkich) [Kukielka 1994; Wang, Blunt i Stout 1998; Tubielewicz 2000; El-Abden, Abdel-Rahman i Mohamed 2002; Melechow, Tubielewicz i Błaszczuk 2004; Zaleski i Lipski 2011].

Nagniatanie poprzez przepychanie pozwala na podwyższenie dokładności wymiarowej i gładkości otworu oraz na umocnienie warstwy wierzchniej. Obróbkę poprzez nagniatające przepychanie ślizgowe wykonuje się w tulejach, cylindrach, korpusach, elementach rurowych, otworach sworzniowych w tłoku, przewodnicach trzonów zaworowych itp. Przepychanie zapewnia prawidłową geometrię i strukturę powierzchni części pracujących w warunkach tarcia oraz podwyższenie wytrzymałości na zmęczenie. Podczas projektowania procesu technologicznego wytwarzania lub regeneracji elementów maszyn powinno się wybrać kształty i odpowiednią liczbę elementów nagniatających oraz warunki obróbkowe i sposób nagniatania.

2. METODYKA BADAŃ NUMERYCZNYCH

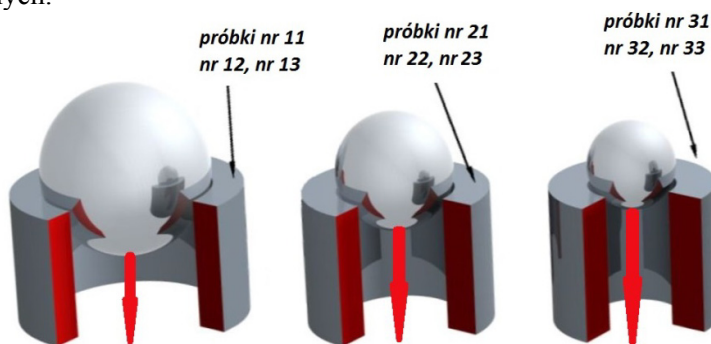
Modelowanie nagniatającego przepychania ślizgowego polegało na określeniu oddziaływania sztywnego narzędzia o określonej krzywiznie na odkształcany przedmiot.

Na podstawie modelu Hertza, który stanowi modyfikację modelu Bussinesqa [Skalmierski 1998; Dyl 2014], uwzględniono, że siła nagniatania rozkłada się na określonej powierzchni kontaktu kulistego narzędzia z przedmiotem obrabianym w półprzestrzeni sprężystoplastycznej. Na powierzchni styku elementu nagniatającego z obrabianym elementem w kształcie tulei ze stali niestopowej określono stan odkształceń. Analizę teoretyczną nagniatającego przepychania ślizgowego prowadzono w sposób numeryczny. Wykorzystano pakiet komercyjny oparty na metodzie elementów skończonych FORGE® [FORGE®2011], który znajduje się w Instytucie Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej.

Nagniatające przepychanie ślizgowe prowadzono poprzez przepychanie kulek przez otwory w tulejach stalowych. Wewnętrzne średnice próbek zostały przygotowane tak, aby były o 0,1 mm, 0,2 mm i 0,3 mm mniejsze niż średnica elementu nagniatającego. Próbki miały postać tulei ze stali niestopowej konstrukcyjnej C45. Każda z próbek miała długość 25 mm. Średnice zewnętrzne próbek w kształcie tulei liczyły od 30 do 45 mm.

Elementami nagniatającymi były kulki ze stali łożyskowej 20CrMo4 o średnicach w zakresie od 15,86 do 33,32 mm. Kształt próbek i elementów nagniatających dobrano na podstawie literatury przedmiotu [Fattouh 1989; Wang, Blunt i Stout 1998; Lipski i Zaleski 2004, Przybylski 2005; Vorontsov 2007; Zaleski i Lipski 2011] i po przeprowadzonych badaniach własnych [Dyl 2010, 2012, 2013].

Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie próbki przeznaczone do badań numerycznych.



Rys. 2. Widok próbek i elementów nagniatających wykorzystanych do badań numerycznych
Fig. 2. The samples and ball burnishing used for numerical research

Symulacje komputerowe nagniatania metodą NPS prowadzono w temperaturze otoczenia. Siły tarcia modelowano na podstawie rozwiązania Treski [Dyja, Mróz i Rydz 2003; Mróz 2008; Rydz 2009; FORGE®2011; Dyl 2014]. Kulka ze stali łożyskowej 20CrMo4 była elementem nagniatającym sztywnym. Czynnikiem tarcia ślizgowego stali po stali wynosi 0,1 [Niezgodziński i Niezgodziński 1996; FORGE®2011].

W celu ustalenia dla stali niestopowej C45 wpływu parametrów odkształcenia na wartość naprężenia uplastyczniającego przeprowadzono badania plastometryczne na dylatometrze odkształceniowym DIL 805 A/D, stosując prędkości odkształcenia $0,1 \text{ s}^{-1}$, 1 s^{-1} i 10 s^{-1} [Dyl 2014]. Uzyskane wyniki zostały wprowadzone do programu za pomocą pliku, zawierającego opracowane współczynniki krzywej płynięcia w zakresie temperatury uzyskiwanej w trakcie modelowania.

Do symulacji komputerowej przyjęto następujące dane wejściowe:

- temperatura początkowa tulei to temperatura otoczenia;
- współczynnik wymiany ciepła pomiędzy materiałem a narzędziem $3000 \text{ [W/K m}^2\text{]}$;
- współczynnik wymiany ciepła pomiędzy materiałem a powietrzem $100 \text{ [W/K mm}^2\text{]}$.

Symulacje komputerowe były prowadzone w trójwymiarowym układzie odniesienia.

Zdefiniowano elementy nagniatające w postaci kulek o różnych średnicach oraz parametry geometryczne i wskaźniki odkształcenia tulei stalowych, które przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry geometryczne i wskaźniki odkształcenia tulei stalowych po nagniatającym przepychaniu ślizgowym

Table 1. The geometric parameters and the rate of deformation of the tube of steel after ballizing process

Próbki nr	D, [mm]	d [mm]	d ₀ , [mm]	w, [mm]	ε _{np} , [%]
11	45	33,32	33,22	0,1	0,3
12	45	33,32	33,12	0,2	0,6
13	45	33,32	33,02	0,3	0,9
21	35	22,00	21,90	0,1	0,5
22	35	22,00	21,80	0,2	0,9
23	35	22,00	21,70	0,3	1,4
31	30	15,86	15,76	0,1	0,6
32	30	15,86	15,66	0,2	1,2
33	30	15,86	15,56	0,3	2,0

Odształcenie plastyczne na zimno powoduje umocnienie przez zgniot struktury materiału warstwy wierzchniej, co wpływa na wzrost wytrzymałości na zmęczenie. W wyniku zwiększenia gęstości dyslokacji, wytworzenia stanu

ściskających naprężeń własnych i zwiększenia twardości warstwy wierzchniej obserwuje się wzrost wytrzymałości na zmęczenie materiału po obróbce nagniataniem o kilkadziesiąt procent dla części bez koncentratorów naprężeń i o kilkaset procent dla części z koncentratorami naprężeń [Dyl 2014].

Względne odkształcenie plastyczne dla nagniatającego przepychania ślizgowego jest wyrażone równaniem:

$$\varepsilon_{np} = \frac{d - d_0}{d_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

Wcisk nagniatania (zadane odkształcenie bezwzględne) obliczany jest z równania:

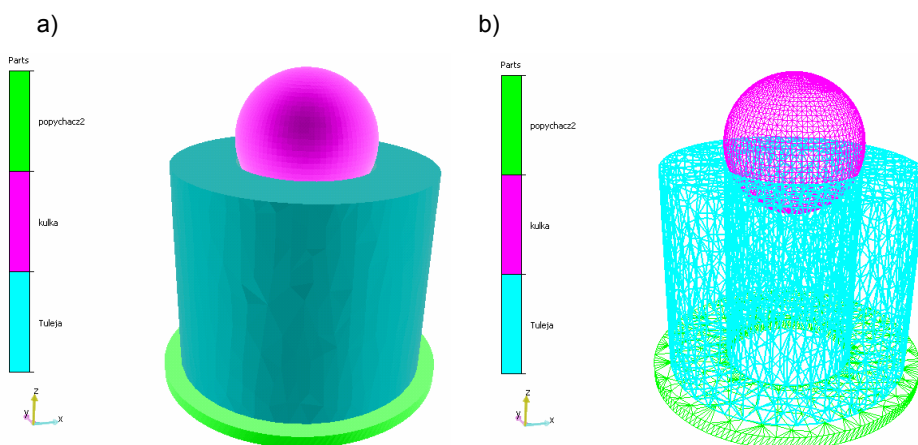
$$w = d - d_0, \quad (2)$$

gdzie:

d – średnica zewnętrzna kulki (elementu nagniatającego) [mm],

d_0 – średnica wewnętrzna tulei przed NPS [mm].

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe złożenia elementów nagniatających wraz z nagniataną tuleją z naniesioną siatką elementów skończonych.



Rys. 3. Przykładowe złożenie elementów w programie FORGE®: a) wygląd powierzchni, b) widok siatki MES

Fig. 3. An example of arrangement of the elements in the program FORGE®: a) the appearance of the surface, b) the grid view FEM

Właściwości reologiczne stali niestopowej C45 i łożyskowej 20CrMo4 zostały wprowadzone do programu FORGE® za pomocą funkcji Hensla-Spittla [Dyja, Mróz i Rydz 2003; Mróz 2008; Rydz 2009; Dyl 2014]:

$$\sigma_p = K_0 e^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}_i^{m_3} e^{\frac{m_4}{\varepsilon}}, \quad (3)$$

gdzie:

σ_p – napężenie uplastyczniające,

ε – intensywność odkształcenia,

$\dot{\varepsilon}_i$ – prędkość odkształcenia,

T – temperatura,

K_0, m_1, m_2, m_3, m_4 – współczynniki materiałowe wyznaczone poprzez aproksymację badań plastometrycznych (tab. 2).

Tabela 2. Współczynniki określające właściwości reologiczne stali wykorzystanych w badaniach numerycznych

Table 2. The factors determining the rheological properties of the steel used in the numerical research

Stal	K_0	m_1	m_2	m_3	m_4
C45	1521,306	- 0,00269	-0,12651	0,14542	-0,05957
20CrMo4	1232,9863	- 0,00254	-0,05621	0,1455	- 0,0324

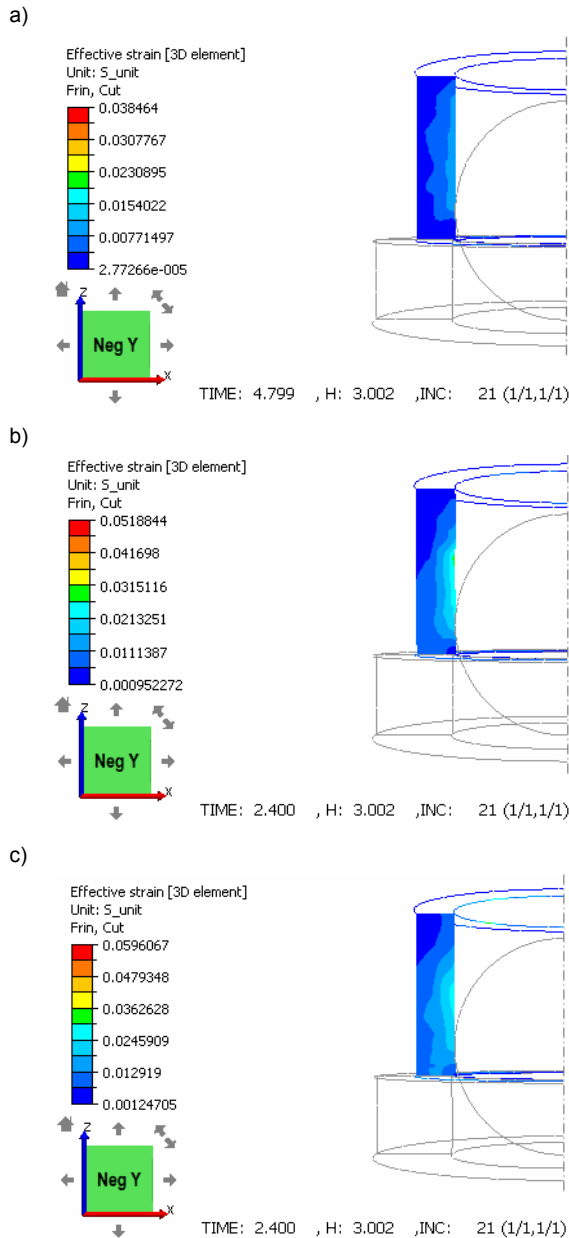
3. WYNIKI BADAŃ NUMERYCZNYCH

Po przeprowadzonych badaniach numerycznych nagniatającego przepychania ślizgowego wyznaczono rozkłady intensywności odkształcenia dla zadanego odkształcenia bezwzględnego (wcisk nagniatania – w).

Na rysunku 4 przedstawiono rozkłady intensywności odkształcenia dla różnych zadanych odkształceń bezwzględnych ($w = 0,1-0,3$ mm) dla średnicy kulki $d = 33,32$ mm.

Na rysunku 5 pokazano rozkłady intensywności odkształcenia dla wcisku w zakresie ($w = 0,1-0,3$ mm) i dla kulki o średnicy $d = 22,00$ mm.

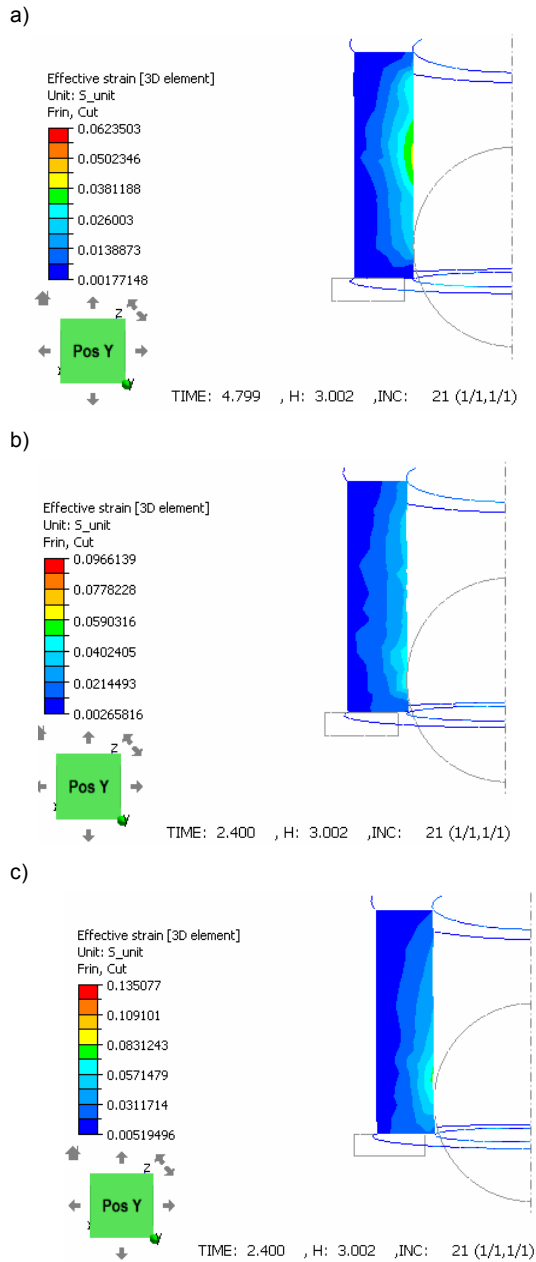
Rozkłady intensywności odkształcenia dla kulki o średnicy $d = 15,86$ mm przy różnych wartościach wcisku nagniatania podanych w zakresie od 0,1 do 0,3 pokazano na rysunku 6.



Rys. 4. Rozkłady intensywności odkształcenia w symulacji komputerowej nagniatającego przepychania ślizgowego dla średnicy kulki $d = 33,32$ mm dla wcisku nagniatania:

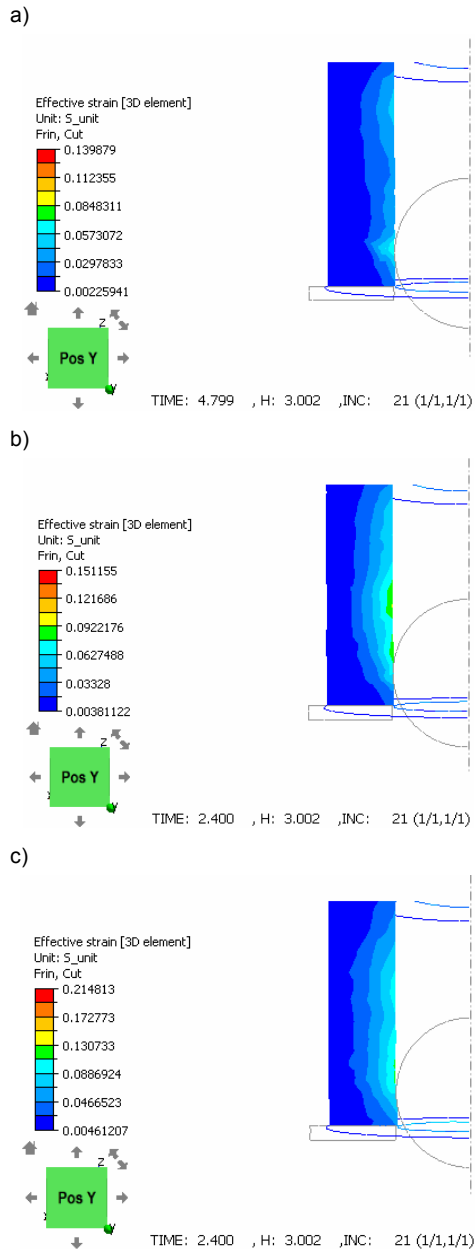
a) $w = 0,1$ mm, b) $w = 0,2$ mm, c) $w = 0,3$ mm

Fig. 4. The effective strain distribution by ball diameter $d = 33.32$ mm for the reduction ratio: a) $w = 0.1$ mm, b) $w = 0.2$ mm, c) $w = 0.3$ mm for ballizing process



Rys. 5. Rozkłady intensywności odkształcenia w symulacji komputerowej nagniatającego przepychania ślizgowo dla średnicy kulki $d = 22,00$ mm dla wcisku nagniatania: a) $w = 0,1$ mm, b) $w = 0,2$ mm, c) $w = 0,3$ mm

Fig. 5. The effective strain distribution by ball diameter $d = 22.00$ mm for the reduction ratio: a) $w = 0.1$ mm, b) $w = 0.2$ mm, c) $w = 0.3$ mm for ballizing process



Rys. 6. Rozkłady intensywności odkształcenia w symulacji komputerowej nagniatającego przepychania ślizgowego dla średnicy kulki $d = 15,86$ mm dla wcisku nagniatania:

a) $w = 0,1$ mm, b) $w = 0,2$ mm, c) $w = 0,3$ mm

Fig. 6. The effective strain distribution by ball diameter $d = 15.86$ mm for the reduction ratio: a) $w = 0.1$ mm, b) $w = 0.2$ mm, c) $w = 0.3$ mm for ballizing process

Na podstawie analizy wyników, zamieszczonych na rysunkach 4, 5 i 6, można stwierdzić, że obserwowane jest zwiększenie intensywności odkształceń w warstwie wierzchniej tulei od jej wewnętrznej strony na styku z elementem nagniatającym.

Stwierdzono również, że zastosowanie większych wartości średnicy kulki nagniatającej powoduje zmniejszenie intensywności odkształcenia, a dla mniejszych średnic elementów nagniatających intensywność odkształcenia osiąga wartości większe. Wraz ze wzrostem wartości średnicy kulki nagniatającej wartości intensywności odkształcenia maleją ze względu na mniejszą powierzchnię kontaktu materiału z narzędziem. Taki charakter stanu odkształcenia jest bezpośrednio zależny od stanu naprężenia, występującego w warstwie wierzchniej tulei, poddanej nagniatającemu przepychaniu ślizgowemu. Po nagniatającym przepychaniu ślizgowym w warstwie wierzchniej konstytuowane są naprężenia własne ściskające, które wynikają ze zwiększonej objętości właściwej materiału w stanie plastycznym. Maksymalne naprężenia co do wartości bezwzględnej występują w pobliżu powierzchni poddanej obróbce nagniataniem. Obecność naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej jest korzystna ze względu na poprawę właściwości użytkowych, szczególnie zaś na wzrost wytrzymałości na zmęczenie elementów maszyn, ale także na zużycie tribologiczne [Dyl 2014].

Do określenia strefy plastycznej w nagniatanym elemencie oraz do wyznaczenia stanu odkształceń, jak również głębokości zalegania odkształceń plastycznych, wykorzystano analizę numeryczną, opartą na metodzie elementów skończonych.

Przeprowadzenie analizy głębokości zalegania odkształceń plastycznych w procesie nagniatania jest istotne ze względu na prawidłowe projektowanie i opracowanie technologii nagniatania.

W pracy [Dyl 2014] określono w sposób numeryczny rozwiązanie kontaktu ciał odkształcalnych na podstawie teorii plastyczności i sprężystości. Opierając się na analizie numerycznej, wyznaczono zależności do obliczenia głębokości odkształceń plastycznych. Dla zadanych warunków brzegowych i określonego zakresu badań wyznaczono na podstawie badań numerycznych nagniatającego przepychania ślizgowego zależność pomiędzy głębokością zalegania odkształceń plastycznych a zadawanym odkształceniem bezwzględnym, równym wartości wcisku, oraz przedstawiono równaniem:

$$h_{\delta} = 0,756 w^{1,667}, \quad (4)$$

gdzie:

h_{δ} – głębokość zalegania odkształceń plastycznych,
 w – wcisk nagniatania.

Po nagniatającym przepychaniu ślizgowym w warstwie wierzchniej od wewnętrznej strony tulei stalowej konstytuowane są odkształcenia plastyczne na określonej głębokości zależnej od wcisku nagniatania.

4. PODSUMOWANIE

Po przeprowadzonej analizie teoretycznej nagniatania metodą NPS określono stan odkształcenia w warstwie wierzchniej tulei. Ustalono, że dla mniejszych wartości średnic kulki intensywność odkształcenia uzyskuje większe wartości. Zauważono również, że wraz ze wzrostem wcisku nagniatania występuje intensywniejszy rozkład odkształcenia w warstwie wierzchniej tulei. Intensywność odkształcenia w procesie nagniatającego przepychania ślizgowego jest zależna od wartości wcisku nagniatania. Wraz ze wzrostem wartości wcisku nagniatania intensywność odkształcenia wzrasta.

Po przeprowadzonej analizie wyników badań określono, że ze względu na uzyskanie korzystnego stanu odkształcenia po nagniataniu metodą NPS należałoby stosować duże wartości wcisku i małe średnice kulki, co potwierdzone jest w literaturze przedmiotowej przez występowanie korzystnego stanu naprężeń ściskających [Dyl 2014]. Głębokość zalegania odkształceń plastycznych wyznacza położenie strefy warstwy wierzchniej względem powierzchni obrabianej. Od głębokości zalegania w warstwie wierzchniej odkształceń plastycznych zależy wiele właściwości użytkowych wyrobów poddanych obróbce nagniataniem, m.in. wytrzymałość na zmęczenie. Głębokość zalegania strefy uplastycznionej wynika z rozwiązania Bussinesqa i zależy od maksymalnego naprężenia stycznego. Wzdłuż kierunku działania siły nagniatania naprężenia zredukowane osiągają wartość nieskończenie dużą na powierzchni przedmiotu i maleją wraz ze zwiększeniem się odległości od powierzchni obrabianego elementu.

LITERATURA

- Dyja, H., Mróz, S., Rydz, D., 2003, *Technologia i modelowanie procesów walcowania wyrobów bimetalowych*, Monografie, Politechnika Częstochowska, Częstochowa.
- Dyl, T., 2009, *Wpływ odkształcenia względnego na wskaźnik zmniejszenia chropowatości i stopień umocnienia warstwy powierzchniowej po obróbce nagniataniem*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 60, s. 100–104.
- Dyl, T., 2010, *The Simulation Spreading Process of Steel Tubes Hollow*, Solid State Phenomena, vol. 165, s. 13–18.
- Dyl, T., 2010, *Wpływ nagniatania na umocnienie elementów części maszyn okrętowych*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 64, s. 36–42.
- Dyl, T., 2011, *Nagniatanie powierzchni płaskich elementów części maszyn okrętowych*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 71, s. 38–48.
- Dyl, T., 2012, *Effect of Relative Strain Ratio on the Reduce Roughness Surface Layer Tube Holes After Burnishing Process*, Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 19, no. 2, s. 137–143.

- Dyl, T., 2013, *Ballizing Process Impact on the Geometric Structure of the Steel Tubes*, Solid State Phenomena, vol. 199, s. 384–389.
- Dyl, T., 2014, *Numeryczna i eksperymentalna analiza procesu nagniatania z wykorzystaniem teorii sprężystości i plastyczności*, Prace Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia.
- El-Abden, S.Z., Abdel-Rahman, M., Mohamed, F.A., 2002, *Finishing of Non-ferrous Internal Surfaces Using Ballizing Technique*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 124, s. 144–152.
- Fattouh, M., 1989, *Some Investigation on the Ballizing Process*, Wear, vol. 134, s. 209–219.
- FORGE@2011, *Reference Guide Release*, Transvalor S.A., Parc de Haute Technologie Sophia – Antipolis.
- Korzyński, M., 2007, *Nagniatanie ślizgowe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Kukielka, L., 1994, *Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem*, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie, Koszalin.
- Lipski, J., Zaleski, K., 2004, *Modelling of Residual Stresses Distribution in Workpiece Past Ballizing Process*, Eksploatacja i Niezawodność, nr 4, s. 18–21.
- Melechow, R., Tubielewicz, K., Błaszczuk, W., 2004, *Tytan i jego stopy, gatunki, właściwości, zastosowanie, technologia obróbki, degradacja*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- Mróz, S., 2008, *Proces walcowania prętów z wzdłużnym rozdzieleniem pasma*, Monografie, Politechnika Częstochowska, Częstochowa.
- Niezdodziński, M.E., Niezdodziński, T., 1996, *Wzory wykresy i tablice wytrzymałościowe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Przybylski, W., 1987, *Technologia obróbki nagniataniem*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Przybylski, W., 2005, *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Gdańsk.
- Rydz, D., 2009, *Analiza procesu walcowania blach bimetalowych z zastosowaniem rozwiązań dla ciał lepkosprężystych*, Monografie, Politechnika Częstochowska, Częstochowa.
- Skalmierski, B., 1998, *Mechanika*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Tubielewicz, K., 1996, *Technologia i oprzyrządowanie w obróbce powierzchniowej*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- Tubielewicz, K., 2000, *Technologia nagniatania żeliwnych części maszynowych*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- Vorontsov, A.L., 2007, *The Stress-Strain State of Hollow Cylindrical Workpieces when Burnishing Holes*, Russian Engineering Research, vol. 2, s. 108–114.
- Wang, K.H., Blunt, L.A., Stout, K.J., 1998, *The 3-D Characterization of the Surface Topography of the Ballizing Process*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol. 38, no. 5–6, s. 437–444.
- Zaleski, K., Lipski, J., 2011, *Modelling on the Ballizing Process of Holes in Workpieces Made of C45 Steel*, w: Świć, A., Lipski, J. (red.), *Management and Control of Manufacturing Processes*, Lublin, s. 114–124.