



Zastosowanie obróbki nagniataniem w tworzeniu ekologicznego produktu

Agnieszka Kułakowska, Radosław Patyk, Łukasz Bohdal
Politechnika Koszalińska

1. Wstęp

Działalność przemysłowa stwarza poważne problemy ekologiczne. Lista ta obejmuje, m.in.: globalne ocieplenie, zubożenie warstwy ozonowej, utratę różnorodności biologicznej, niedobór zasobów naturalnych, zanieczyszczenie powietrza, kwaśne deszcze, odpady toksyczne i wypadki przemysłowe. Nie ma zgody, co do skali, stopnia i skutków ekologicznej degradacji środowiska. Pożądana jest natomiast lepsza równowaga między zmiennymi ekonomicznymi i ekologicznymi [12]. Dlatego tak ważny jest rynek technologii środowiskowych w Polsce.

Technologie środowiskowe obejmują wszelkiego rodzaju produkty, procesy technologiczne, usługi, a nawet koncepcje działania, które w trakcie swojego cyklu życia powodują znacznie mniejszą uciążliwość dla środowiska naturalnego, niż inne, alternatywne substytuty. Ich zastosowanie wiąże się między innymi z ograniczeniem zanieczyszczenia, zmniejszeniem ryzyka środowiskowego i innych negatywnych oddziaływań wynikających z wykorzystania zasobów (w tym energii) w stosunku do rozwiązań alternatywnych [13]. Z definicji wynika, że zakres funkcjonalny firm i organizacji operujących na analizowanym rynku jest niezwykle szeroki i istotny, gdyż dotyczy wszelkich możliwych form działalności prowadzących do zmniejszenia negatywnego wpływu oddziaływania człowieka na środowisko naturalne [13]. W XXI wieku przygotowując produkcję nowych wyrobów należy stosować zasadę „*ekoprojektowania produktu*”, która polega na ograniczeniu szkodliwego oddziaływania na otaczające środowisko naturalne człowieka. Dominującą rolę

w tym działaniu odgrywa racjonalne wykorzystanie energii i ochrona środowiska. W tym aspekcie ważnym jest prawidłowe opracowanie i właściwa realizacja procesu technologicznego [1, 2].

W pracy przedstawiono jedną z ekologicznych metod obróbki wykończeniowej metali, jaką jest obróbka nagniataniem [4–6]. Zastosowanie obróbki nagniataniem pozwala uzyskać niską chropowatość powierzchni oraz utwardzenie warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu i konstytuować w niej naprężenia ściskające. Występowanie tych efektów obróbki sprawia, że elementy nagniatane cechują się lepszymi właściwościami użytkowymi, niż elementy obrabiane w sposób konwencjonalny [3, 7–11].

W technice wytwarzania następuje obecnie wzrost udziału metod bezwiórowych, w tym także w obróbce dokładnych części maszyn. Współczesne obrabiarki CNC umożliwiają, bowiem obróbkę powierzchni z dużą dokładnością wymiarową (w 7 i 6 klasie dokładności), co umożliwi w praktyce osiągnięcie wielu korzyści wynikających ze stosowania nagniatania na obrabiarkach skrawających. W procesie nagniatania nie wytwarza się wiórów i iskier, jak w przypadku stosowania obróbki wiórowej i ścierniej. Jest również obróbką bezpyłową [11].

Możliwości obróbki nagniataniem powodują, że ma ona wiele istotnych zalet, wynikających przede wszystkim z jej bezwiórowego, plastycznego charakteru. Przedstawiono grupę podstawowych zalet, które są charakterystyczne dla technologii nagniataniem, a których znajomość może ułatwić analizę jakościową podczas projektowania procesów technologicznych a także ma pozytywny wpływ na środowisko. Do najważniejszych zalet zalicza się:

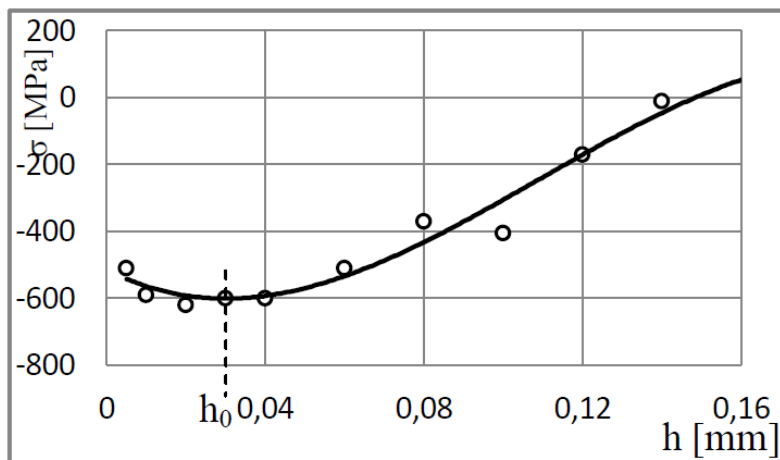
- dużą efektywność wygładzenia powierzchni w jednym przejściu roboczym narzędzia oraz dużą wydajność obróbki (ok. czterokrotnie większą w porównaniu ze szlifowaniem),
- możliwość stosowania narzędzi nagniatających na uniwersalnych obrabiarkach skrawających,
- ograniczenie lub eliminacja pracochłonnych operacji wykończeniowych, jak: skrobanie, dogładzanie, docieranie,
- dużą trwałość narzędzi nagniatających, co ułatwia automatyzację procesu nagniatania oraz stosowanie nagniataków w liniach i centrach obróbkowych,

- małe zapotrzebowanie mocy dla realizacji operacji nagniatania i lepsze wykorzystanie materiału obrabianego (obróbka bezwiórowa),
- możliwość łączenia nagniatania ze wstępną obróbką skrawaniem w jedną operację, przy użyciu specjalnego oprzyrządowania (np. roz-taczanie z nagniataniem gładkościowo-wymiarowym),
- w pewnych przypadkach możliwość zastąpienia utwardzającej obróbki cieplnej dużych przedmiotów przez nagniatanie,
- obróbką bez konieczności chłodzenia strefy nagniatania; konieczne jest jednak smarowanie dla zmniejszenia zużycia elementów nagniatających i otrzymania lepszych efektów obróbki,
- możliwość obróbki ostatecznej powierzchni z ochronnymi powłokami z twardych warstw odpornych na zużycie ściernie nakładanymi galwanicznie lub wytwarzanymi metodą ciepłno-chemiczną,
- duże bezpieczeństwo i pełna higiena pracy, ponieważ obróbka nagniataniem może odbywać się bez chłodzenia oraz przy całkowitym braku wiórów, szkodliwych pyłów czy iskier [11].

Celem artykułu jest wykazanie możliwości zastosowania innowacyjnej technologii obróbki nagniataniem w procesie tworzenia ekoprodktu. Stosując zasadę ekoprojektowania należy wziąć proces konstruowania i wytwarzania. Obróbka nagniataniem jest efektywną technologicznie, ekonomicznie i ekologicznie metodą wywarzania warstw wierzchnich części maszyn. Według danych literaturowych [4, 5, 7, 11] obiecujące wyniki można uzyskać stosując powierzchniową obróbkę plastyczną. Umożliwia ona uzyskanie wyrobu o korzystnie ukształtowanej warstwie wierzchniej dostosowanej do warunków eksploatacji (można sterować parametrami chropowatości powierzchni oraz stanem naprężeń własnych). Badania proponowanej technologii mają na celu potwierdzenie możliwości sterowania właściwościami WW wyrobu w aspekcie uzyskiwania optymalnych właściwości użytkowych. Takie podejście umożliwi produkcję części z minimalnymi stratami materiałowymi oraz energetycznymi. W celu wykazania możliwości tworzenia ekoprodktu przeprowadzono badania eksperymentalne i numeryczne procesu nagniatania naporowo-tocznego wykazujące możliwość sterowania stanem warstwy wierzchniej wyrobu (stanem powierzchni i stanem naprężeń).

2. Naprężenia w obróbce nagniataniem

Z literatury [11] wiadomo, że stosując nagniatanie powierzchniowe można wytwarzać teksturę zgniotu (do głębokości kilku milimetrów) i wprowadzać trwałe naprężenia ściskające (do ok. -1200 MPa), co powoduje zwiększenie twardości, podwyższenie odporności na działanie czynników eksploatacyjnych, takich jak: ścieranie, zmęczenie postaciowe i powierzchniowe, korozja powierzchniowa. Występowanie tych efektów obróbki sprawia, że elementy nagniatane cechują się lepszymi właściwościami użytkowymi, niż elementy obrabiane w sposób konwencjonalny, np. toczeniem, frezowaniem czy szlifowaniem. Powodem powstawania ściskających naprężeń wewnętrznych jest dążenie warstwy odkształcanej do zwiększania powierzchni, któremu przeciwdziałają sprężyste, głębiej położone, warstwy metalu. W rezultacie zewnętrzne warstwy nie mają możliwości zwiększenia swej powierzchni. Skutkiem tego w warstwach położonych głębiej powstają równoważące naprężenia rozciągające w rdzeniu.



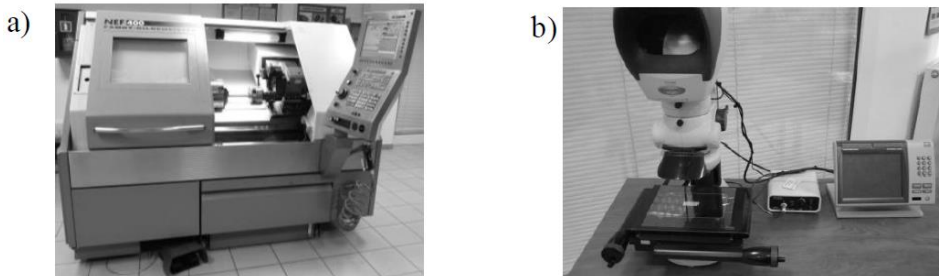
Rys. 1. Typowy przebieg krzywej rozkładu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej po nagniataniu ulepszonej stali C45 z: siłą $F = 3190$ N, posuwem $f = 0,213$ mm/obr., promień zaokrąglenia profilu krążka $R_k = 20$ mm [11]

Fig. 1. Typical curve of stress distribution in surface layer after burnishing rolling on improved steel C45 with: force $F = 3190$ N, feed $f = 0,213$ mm/rot., radius of roller profile rounding $R_k = 20$ mm [11]

Typowy rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przy obróbce nagniataniem sposobem tocznym przedstawiono przykładowo na rysunku 1 [11]. Krzywa naprężeń ściskających dla dużych sił nagniatania ma na ogół punkt przegięcia, leżący w odległości h_0 od powierzchni nagniatanej. Naprężenia w warstwach położonych na głębokości $h < h_0$ zmniejszają się. W warstwach leżących głębiej, niż h_0 naprężenia ściskające zmniejszają się również, aż do punktu zerowego, a następnie zmieniają znak, stając się naprężeniami rozciągającymi rdzenia.

3. Przygotowanie próbek do badań

Przygotowanie próbek pod nagniatanie gładkościowe przeprowadzono na tokarce numerycznej NEF 400 ze sterowaniem Fanuc 210 is. Próbki mocowano w samocentrującym uchwycie trójśczękowym zaciskanym hydraulicznie. Przygotowano próbki, których powierzchnie charakteryzują się kątem wierzchołkowym nierówności $\theta=90^\circ$ oraz skokiem $s=2$ [mm]. Wybrane parametry powierzchni próbek (θ , s) zmierzono na mikroskopie pomiarowym firmy Kestler - Vision Engineering Dynascope z systemem pomiarowym ND 1300 Quadra-Chek (rys. 2), a uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 1.



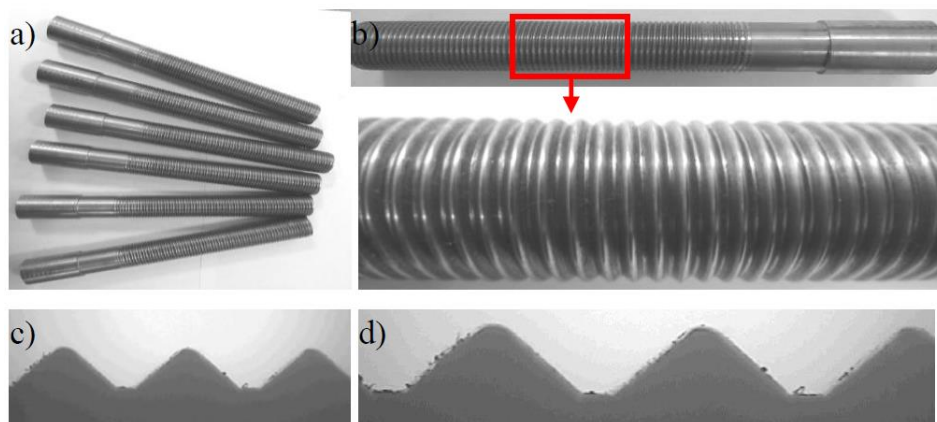
Rys. 2. Tokarka ze sterowaniem numerycznym NEF 400 (a), mikroskop Kestler (b)
Fig. 2. Numerical control lathe NEF 400 (a), Kestler measuring microscope (b)

Próbki po obróbce poprzedzającej nagniatanie zostały zmierzone i sfotografowane. Uzyskane wyniki pomiarów próbek przedstawiono w tabeli 1.

Zdjęcia próbek z regularnymi nierównościami o kącie wierzchołkowym nierówności $\theta = 90^\circ$ i skoku $s = 2$ [mm], widok ogólny próbek, powiększenie i widoki zarysu przedstawiono na rysunkach 3 a, b, c, d.

Tabela. 1. Wyniki pomiarów powierzchni próbek po obróbce poprzedzającej
Table. 1. Results of surface sample measurements after previous machining

Pomiar	Nr próbki	Skok [mm]	Kąt wierzchołkowy θ
Teoretyczne	-	2,000	90°
Rzeczywiste	1	1,975	90°13'45"
	2	1,98	89°52'56"
	3	1,984	91°05'36"
	4	1,994	91°06'15"
	5	1,975	89°08'28"
	6	1,977	88°56'56"



Rys. 3. Zdjęcia próbek z wykonanymi regularnymi nierównościami o kącie wierzchołkowym nierówności $\theta = 90^\circ$ i skoku $s = 2$ [mm]: a) widok ogólny próbek, b) powiększenie, c) i d) widok zarysu

Fig. 3. Photos of samples with regular asperities with vertical angle $\theta = 90^\circ$ and feed $s = 2$ [mm]: a) general view of samples, b) zoom, c) i d) outline view

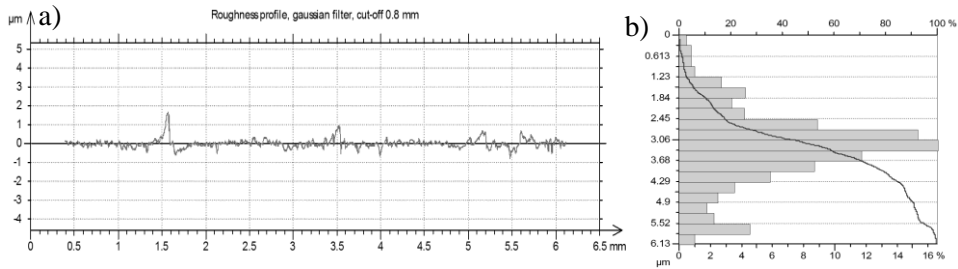
Proces nagniatania gładkościowego wykonywano na nagniatarce firmy FETTE (rys. 4) wyposażonej w głowicę FU3 z zamontowanymi specjalnymi krążkami do nagniatania gładkościowego.

Chropowatość powierzchni po nagniataniu gładkościowym zmierzono na profilometrze T8000 firmy Hommelwerke. Przykładowy profil powierzchni próbki oraz jej udział nośny liniowy przedstawiono na rysunku 5. Uzyskane parametry chropowatości powierzchni próbki: $R_a = 0,155$ [μm], $R_z = 1,23$ [μm] i $R_{sm} = 0,0788$ [mm].



Rys. 4. Stanowisko do nagniatania gładkościowego: a) widok ogólny, b) widok układu OUPN, c) widok ogólny głowicy typ FU3 firmy FETTE

Fig. 4. Position for smooth burnishing: a) general view, b) detail view, c) general view of the head type FU3 FETTE



Rys. 5. Profil chropowatości powierzchni próbki po nagniataniu gładkościowym (a) i jej udział nośny liniowy (b)

Fig. 5. Surface roughness profile after smoothing burnishing (a) linear bearing of the profile (b)

3. Badania stanu naprężeń w warstwie wierzchniej

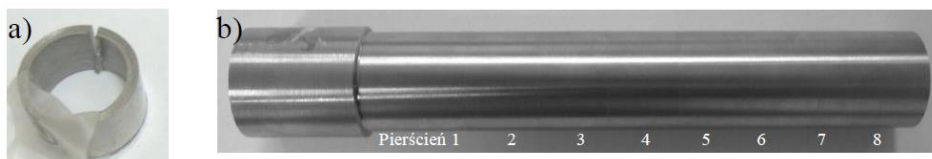
Badania stanu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej po nagniataniu wykonano metodą Dawidenkowa. Metoda ta obejmuje opracowanie metody pomiarowej, do określania naprężeń własnych występujących w warstwach powierzchniowych próbek walcowych po nagniataniu. Usuwanie kolejnych warstw materiału realizowano poprzez ich szlifowanie z parametrami gwarantującymi nieingerowanie w stan naprężeń. Według metody pomiaru naprężeń własnych Dawidenkowa całkowite naprężenie obwodowe w dowolnej warstwie pierścienia jest sumą trzech składowych naprężeń:

$$\sigma_t = \sigma_{t_1} + \sigma_{t_2} + \sigma_{t_3}, \quad (1)$$

gdzie:

σ_{t_1} – część całkowitego naprężenia wyzwolona w wyniku przecięcia pierścienia, σ_{t_2} – część całkowitego naprężenia wyzwolona w wyniku usunięcia badanej warstwy, σ_{t_3} – część całkowitego naprężenia wyzwolona w wyniku usunięcia poprzednich warstw.

Operacje technologiczne przygotowania powierzchni badanych (próbek do pomiaru naprężeń obwodowych) obejmowały: wiercenie i rozwiercanie otworu na $\varnothing 16,1$ mm w nagniecionych wałkach, cięcie pierścieni na szerokość 10 mm. Przygotowanie próbek do pomiarów naprężeń obejmowało następujące czynności: pomiar średnicy zewnętrznej D_z i grubości pierścienia g_0 (w 3 punktach z dokładnością $\pm 0,01$ mm), rozcięcie próbek wzdłuż tworzącej piłką ręczną, pomiar średnicy wewnętrznej próbek po rozcięciu D_{ZR} mikrometrem (w 3 punktach z dokładnością $\pm 0,01$ mm). Przykłady próbek pierścieniowych przedstawiono na rysunku 6. Na podstawie pomiarów obliczono zmianę średnicy pierścienia ΔD_p , jako różnicę średniej średnicy zewnętrznej pierścienia po rozcięciu $D_{ZR\acute{S}R}$ i średniej średnicy zewnętrznej pierścienia przed rozcięciem $D_{Z\acute{S}R}$ ($\Delta D_p = D_{ZR\acute{S}R} - D_{Z\acute{S}R}$).



Rys. 6. Zdjęcia przykładowych próbek pierścieniowych (a), z powierzchniami o różnej grubości zdjętej warstwy poprzez szlifowanie (b)

Fig. 6. Photos of exemplary ring samples (a), with the surface of varying layer thickness removed by grinding (b)

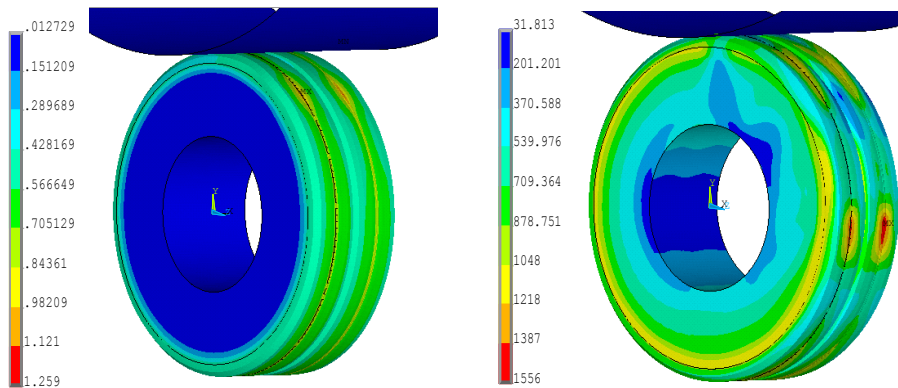
W obliczeniach przyjęto moduł Younga $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa i współczynnik Poissona $\nu = 0,3$. Średnice pierścieni mierzone były mikromierzem, w trzech kierunkach, a wyniki uśredniano. Wobec uproszczenia pomiarów obliczeniu podlegają tu tylko naprężenia σ_{t_2} i σ_{t_3} . Bazując na pomierzonych zmianach średnicy zewnętrznej pierścieni wartości σ_{t_2} i σ_{t_3} ustalono również w oparciu o wzory. Wartości $\frac{dD}{da}$ określono z wykresów. Z każdej z przygotowanych próbek usuwano warstwę poprzez

szlifowanie wykończeniowe o grubości 0,04–0,05 mm. Po zdjęciu warstwy ściernicę przesuwano o wartość 20 mm i ponownie szlifowano itd. W efekcie na każdej próbce otrzymano po 8 pierścieni o różnej grubości zdjętej warstwy (rys. 6). Następnie każdy pierścień odcinano na tokarce NEF400 i przecinano wzdłuż tworzącej. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wykresu porównując je z wynikami z symulacji komputerowych (rys. 8).

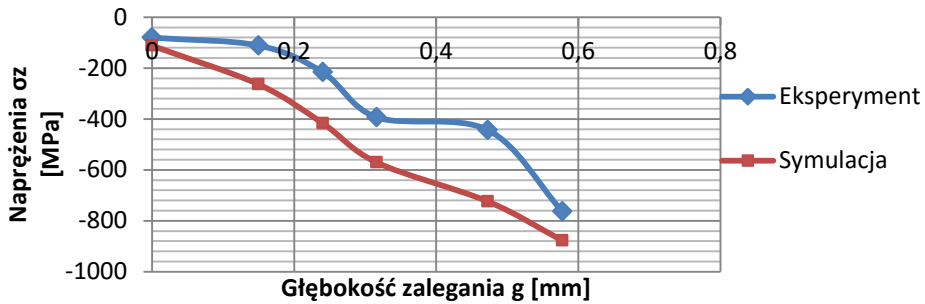
4. Analiza i symulacja numeryczna

W literaturze dotyczącej obróbki nagniatania często pomija się badania symulacyjne, koncentrując się na metodach eksperymentalnych. Badania symulacyjne w znacznym stopniu ułatwiają rozwiązanie postawionego problemu przez, m.in.: ograniczenie konieczności wykonywania badań eksperymentalnych, obniżenie kosztów i zmniejszenie czasochłonności i energochłonności. W pracy przeprowadzono badanie procesu nagniatania naporowego tocznego powierzchni chropowatych. Opracowano model fizyczny procesu stanowiący zbiór zjawisk, założeń i uproszczeń, model matematyczny, zawierający równania algebraiczne i różniczkowe oraz nierówności i funkcje warunkowe, na podstawie, których można przewidzieć przebieg zjawisk fizycznych w modelowanym procesie. Przeprowadzono symulacje nagniatania regularnych, trójkątnych nierówności powierzchni twardym i gładkim narzędziem. W tym celu opracowano model geometryczny, a następnie aplikację 3D w programie ANSYS/LS-Dyna. Do analizy, jako materiał obrabiany zastosowano model sprężysto/lepko-plastyczny z umocnieniem liniowym o parametrach odpowiadających stali C45. Narzędzie nagniatające (rolkę) zamodelowano, jako idealnie sztywne i nieodkształcalne ($E \rightarrow \infty$). Wałek nagniatany z naniesionymi nierównościami powierzchni o kącie wierzchołkowym $\theta=90^\circ$ obraca się z prędkością początkową równą $v = 5$ m/s, następnie następuje dojazd elementu nagniatającego (rolki) do powierzchni obrabianej. Kontakt rolki z powierzchnią powoduje również obrót rolki. Obiekty podzielono na elementy skończone, które zagęszczono w strefie kontaktu. Istotne jest, aby siatka była dostatecznie gęsta, gdyż wpływa to na dokładność obliczeń numerycznych. W rozpatrywanym przypadku obiekt podzielono na 258828 elementów skończonych, posiadał on 273565 węzłów.

Przykładowe analizy wykonano dla przypadku przestrzennego stanu odkształcenia i naprężenia. Mapy odkształceń i naprężeń zredukowanych po procesie nagniatania modelu 3D przedstawiono na rysunku 7. Zależność naprężeń od głębokości ich zalegania dla wyników uzyskanych w drodze eksperymentu i symulacji komputerowej przedstawiono na rysunku 8. Uzyskane wyniki na drodze eksperymentalnej i numerycznej nie różnią się od siebie istotnie na poziomie ufności $\alpha=0,05$. Uzyskane krzywe zmian naprężeń σ_z w funkcji zalegania g nie są pełnym przebiegiem ich zmian w WW wyrobu. Wykazano natomiast, że zastosowanie do nagniatania powierzchni z specjalnie przygotowanymi regularnymi trójkątnymi nierównościami powierzchni powoduje znaczne zwiększenie grubości WW tzn. znaczne zwiększenie głębokości zalegania naprężeń ściskających.



Rys. 7. Mapy odkształceń i naprężeń zredukowanych
Fig. 7. Maps of reduced strains and stresses



Rys. 8. Wykres zmian naprężeń własnych od głębokości ich zalegania
Fig. 8. Graph of residual stress changes depending on the depth of the deposition

5. Wnioski

Metody eksperymentalne umożliwiają pomiar dwóch składowych naprężeń obwodowych i osiowych. Jest to poważne ograniczenie, gdyż w rzeczywistości wymagana jest znajomość wszystkich składowych tensora naprężeń, z których można obliczyć, np. intensywność naprężeń. Obecnie obliczenie wszystkich składowych naprężeń jest możliwe na drodze numerycznej. Dlatego też, celem pomiarów eksperymentalnych naprężeń było porównanie ich wartości i rozkładu eksperymentalnego z numerycznym. Przy czym, w przypadku obliczeń numerycznych, możliwe jest określenie stanu naprężeń w dowolnym przekroju na długości próbki. W przypadku, badań eksperymentalnych, wyniki są uśredniane dla całej wysokości próbki. Dlatego też, rozkłady naprężeń określanych metodą numeryczną były uśredniane z pięciu przekrojów na długości pomiarowej odpowiadającej wysokości próbki pierścieniowej równej 10 mm. Wynika z nich duża zgodność uzyskanych wyników obliczeń numerycznych z wynikami pomiarów eksperymentalnych. Świadczy to również o poprawności opracowanych modeli matematycznych, algorytmów i aplikacji w systemie ANSY/LS-Dyna. To spostrzeżenie może być podstawą przyszłych zastosowań obliczeń numerycznych do prognozowania właściwości warstwy wierzchniej wyrobu. Pomiarów eksperymentalne będą jedynie ich uzupełnieniem w celu wybiórczego potwierdzenia poprawności obliczeń. Pozwoli to na podniesienie jakości używanych wyrobów i zmniejszenie odpadów materiałowych. Spowoduje

to bezpośrednio zmniejszenie zużycia energii i przyczyni się do ograniczenia negatywnego wpływu tego procesu na otaczające środowisko.

Literatura

1. **Bohdal Ł.:** *Finite element simulation of 3D sheet metal guillotining using elastic/visco-plastic damage model*. Steel Research International. Special Edition: 14th International Conference on Metal Forming, 1419–1422 (2012).
2. **Bohdal Ł., Walczak P.:** *Eco-modeling of metal sheet cutting with disc shears*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection) 15, 863–872 (2013).
3. **Kukielka L., Kułakowska A., Patyk R.:** *Numerical modeling and simulation of the movable contact tool-workpiece and application in technological processes*, Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics. Vol. 8/3, 36–41 (2010).
4. **Kułakowska 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, 42–48 (2008).
5. **Kułakowska A.:** *Problems of surface preparation under burnishing rolling in aspect of product quality*. Steel Research International, vol. 81/9, 218–221 (2010).
6. **Kułakowska A.:** *Experimental researches of burnishing rolling process of regular surface asperities prepared in turning process*. Steel Research International. Special Edition: 14th International Conference on Metal Forming, 127–131 (2012).
7. **Legutko S., Nosal S.:** *Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej części maszyn*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 2004.
8. **Patyk R.:** *Theoretical and experimental basis of regular asperities about triangular outline embossing technology*. Steel Research International, vol. 81/9, 190–193 (2010).
9. **Patyk R., Kukielka L.:** *Optimization of geometrical parameters of regular triangular asperities of surface put to smooth burnishing*. Steel Research International, vol. 2, 642–647 (2008).
10. **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, 115–117 (2012).

11. **Przybylski W.:** *Technologia obróbki nagniataniem*, WNT, Warsaw 1987.
12. **Shrivastava P.:** *Environmental technologies and competitive advantage*, Strategic Management Journal, vol. 16, 183–200 (1995).
13. **Wrzesiewski & Miler s.c.:** *Rynek polskich technologii środowiskowych*, raport 2010, MŚ, "GreenEvo - Akcelerator Zielonych Technologii".

Application of Burnishing Process in Creating Environmental Product

Abstract

The aim of this article is to demonstrate the applicability of innovative burnishing rolling process in the creation of eco-product. Applying the principle of eco-design one should take into account the construction and manufacturing process. Burnishing rolling process is effective: technologically, economically and environmentally way of treatment of the machine's outer layers. According to the literature promising results can be achieved by using a surface plastic treatment. It allows to receive product with advantageous shaped surface layer adapted to the conditions of exploitation (it is possible to control the surface roughness parameters and residual stress state). Study of the proposed technology may to confirm the possibility of steering of surface layer properties in aspect of receiving optimal utility properties. This approach will make possible the production of parts with minimal loss in material and energy. In order to prove the ability to create eco-product one conducted experimental and numerical researches of burnishing rolling process showing the ability to control the state of the surface layer of the product (surface condition and the state of stress).

Słowa kluczowe: proces nagniatania, warstwa wierzchnia wyrobu, produkt ekologiczny

Key words: burnishing process, surface layer of the product, eco-product