



Wybrane aspekty ekoinnowacyjnej obróbki nagniataniem

*Agnieszka Kułakowska, Radosław Patyk, Łukasz Bohdal,
Paweł Kałduński, Jarosław Chodór
Politechnika Koszalińska*

1. Wstęp

Optymalizacja procesów produkcyjnych oraz związane z tym odpowiedzialne zużywanie zasobów, stanowi jeden z istotnych aspektów działalności firm. Wydajne i nowoczesne zakłady produkcyjne powinny nieustannie dążyć do minimalizacji wpływu procesów produkcyjnych na glebę, powietrze i wodę (Adamczyk 2004, Baran i in. 2013). Coraz więcej nowoczesnych firm poprzez bilans ekologiczny ukazuje wpływ działalności firmy na środowisko.

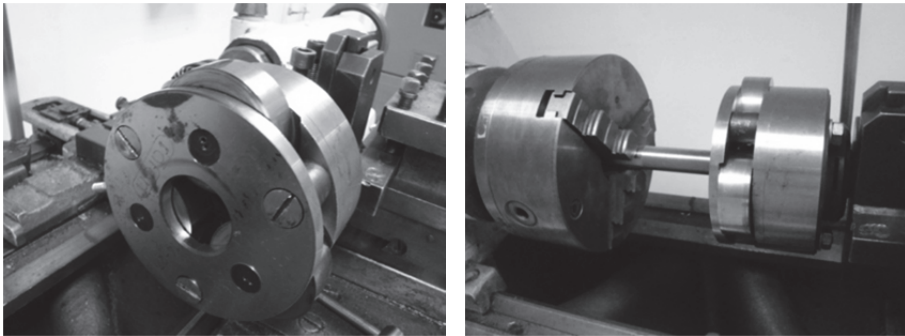
Definicja ekobilansu określa go, jako możliwie szerokie porównanie oddziaływania na środowisko dwóch lub większej liczby różnych produktów, grup produktów, systemów, sposobów produkcji i zaleceń wykonywanych czynności (Adamczyk 2004). Służy on ujawnieniu słabych stron, polepszeniu własności ekologicznych produktów, określeniu prawidłowych decyzji przy wyborze i zakupach materiałów, wspieraniu produktów i sposobów postępowania przyjaznych środowisku, porównywaniu alternatywnych technologii oraz uzasadnieniu decyzji dotyczących produkcji i handlu (Adamczyk 2004). Podstawowym założeniem ekobilansu jest systemowy sposób analizy obejmujący funkcjonowanie w przedsiębiorstwie takich podsystemów, jak: zaopatrzenie (wraz z pozyskaniem surowców), produkcja oraz dystrybucja wyrobów i recykling odpadów w fazie pozaużytkowej.

Ekoinnowacyjna obróbka nagniataniem przyczynia się do stworzenia nowych rozwiązań dostarczających wartości dodanej konsumentom i przedsiębiorcom istotnie zmniejszając oddziaływanie na środowisko. W procesie nagniatania (Kukielka 2001, Kukielka i in. 2003, Kukielka i in. 2005, Kukielka i in. 2010, Kukielka 2012, Kukielka K. i in. 2013, Kukielka i in. 2016, Kulakowska 2012, Kulakowska i in. 2014, Kulakowska i in. 2016, Kulakowska & Patyk i in. 2014, Kukielka & Kukielka i in. 2014, Kukielka K. i in. 2014.), który jest obróbką plastyczną, nie wytwarza się wiórów i iskier, jak w przypadku stosowania obróbki wiórowej i ścierniej. Jest również obróbką bezpyłową (Przybylski 1987). Podstawowe zalety, które są charakterystyczne dla technologii nagniataniem, a których znajomość może ułatwić analizę jakościową podczas projektowania procesów technologicznych, mające także pozytywny wpływ na środowisko, zamieszczono w pracach (Bohdal i in. 2013, Bohdal i in. 2014, Bohdal i in. 2016, Bohdal & Kulakowska i in. 2014). W literaturze (Bohdal & Kukielka i in. 2014, Chodor i in. 2016, Chodor i in. 2014, Kaldunski 2016, Kaldunski i in. 2014, Malag i in. 2014, Mysliński i in. 2004, Patyk i in. 2016, Patyk 2012, Patyk i in. 2014, Patyk & Kukielka i in. 2014, Tse i in. 2007) duży nacisk kładzie się również na ekoprojektowanie obróbki z wykorzystaniem nowoczesnych metod analizy i symulacji. W niniejszej pracy nacisk położono głównie na podsystem wytwarzania produktów w ekoinnowacyjnej obróbce nagniataniem.

Celem artykułu jest wykazanie możliwości zastosowania ekoinnowacyjnej technologii obróbki nagniataniem w procesie tworzenia produktu. Obróbka nagniataniem jest efektywną technologicznie, ekonomicznie i ekologicznie metodą wytwarzania warstw wierzchnich części maszyn. Takie podejście umożliwi produkcję części z minimalnymi stratami materiałowymi oraz energetycznymi. W celu wykazania możliwości tworzenia produktu w ekoinnowacyjnej obróbce nagniataniem przeprowadzono badania eksperymentalne procesu nagniatania naporowo-tocznego wykazujące możliwość kształtowania warstwy wierzchniej wyrobu o pożądanych właściwościach. Wśród rozpatrywanych wybranych aspektów rozpatrywano: chropowatość powierzchni, nanochropowatość, udział materiałowy, mikrostrukturę powierzchni, strukturę metalograficzną oraz mikrotwardość.

2. Stanowiska badawcze i parametry obróbki

Wszystkie badania zostały przeprowadzone na konwencjonalnych maszynach. Użyto nowych narzędzi w celu zminimalizowania wpływu narzędzi na wyniki badań. Obróbkę średnic wałków ze stali Duplex wykonano w V, zaś powierzchni czołowych w VII klasie dokładności, na tokarce konwencjonalnej TUB 150. Średnica i długość wałków wynosiły: $d = 22,5 \text{ mm}$ i $l = 200 \text{ mm}$. Parametry obróbki toczeniem były następujące: $v_t = 0,44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $a_t = 0,5 \text{ mm}$, $f = 1 \text{ mm}\cdot\text{obr}^{-1}$, użyto nóż: Hoffmann Group MTJNR 2525 M16 25R567 oraz Peamet SER 2525 M16 D. Proces nagniatania naporowego tocznego wałków przeprowadzono za pomocą trójrolkowej głowicy nagniatającej z dociskiem sztywnym z rolkami firmy – Rafan NUGh 14-27 (rys. 1). Posuw nagniatania równy był posuwowi obróbki poprzedzającej, natomiast prędkość nagniatania $v_n = 0,06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Obróbka odbywała się tylko w jednym przejściu głowicy nagniatającej po powierzchni wałka.

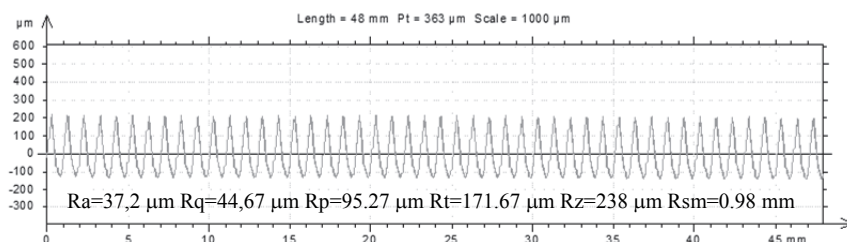


Rys. 1. Stanowisko do nagniatania gładkościowego: a) widok ogólny, b) widok układu OUPN, c) widok ogólny głowicy typ FU3 firmy FETTE

Fig. 1. Machining station for smooth burnishing: a) general view, b) detail view, c) general view of the head type FU3 FETTE

3. Chropowatość powierzchni obrobionej

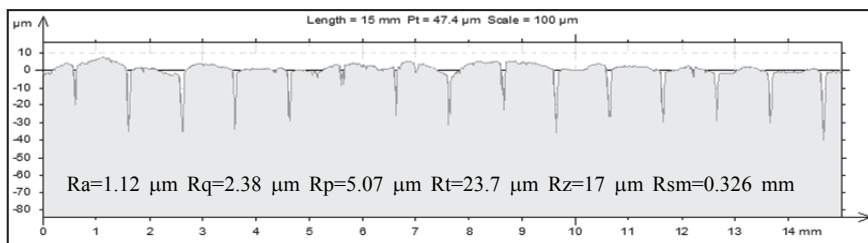
Przykładowy profil chropowatości powierzchni po procesie toczenia na tokarce konwencjonalnej przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Profilogram chropowatości powierzchni wałka ze stali Duplex toczonej na tokarce konwencjonalnej

Fig. 2. Roughness profile of the shaft surface from the steel Duplex, prepared in turning process on the conventional lathe

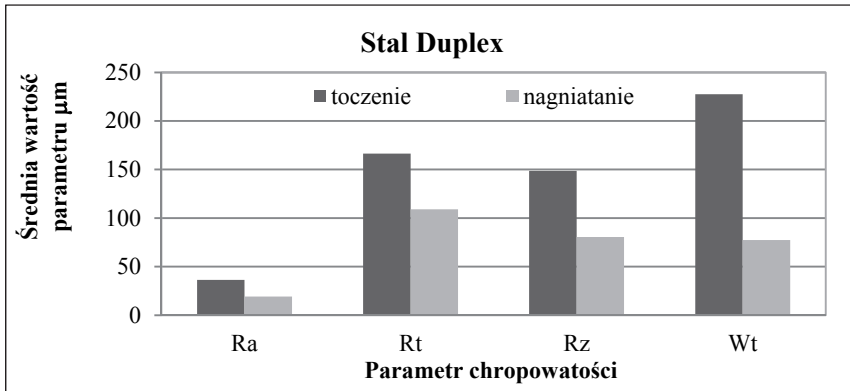
Powierzchnia wałków po obróbce poprzedzającej toczeniem charakteryzowała się profilem zdeterminowanym, po nagniataniu otrzymano również powierzchnię o profilu zdeterminowanym. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów powierzchni po procesie nagniatania.



Rys. 3. Profilogram chropowatości powierzchni wałka ze stali Duplex toczonej na tokarce konwencjonalnej a następnie nagniatanej

Fig. 3. Roughness profile of the shaft surface from the steel Duplex, prepared in turning process on the conventional lathe and then burnished

Mimo, że kąt wierzchołkowy nierówności po procesie toczenia wynosił $\theta=90^\circ$ i po procesie nagniatania uzyskano gładkie powierzchnie, to na wynik chropowatości po nagniataniu znaczny wpływ mają pozostałości po wgłębieniach pomiędzy nierównościami. Jest to charakterystyczne dla powierzchni o kątach wierzchołkowych nierówności $\theta \leq 90^\circ$. Na rysunku 4 przedstawiono wykresy słupkowe wskazujące wartości parametrów chropowatości powierzchni po obróbce poprzedzającej i po nagniataniu.



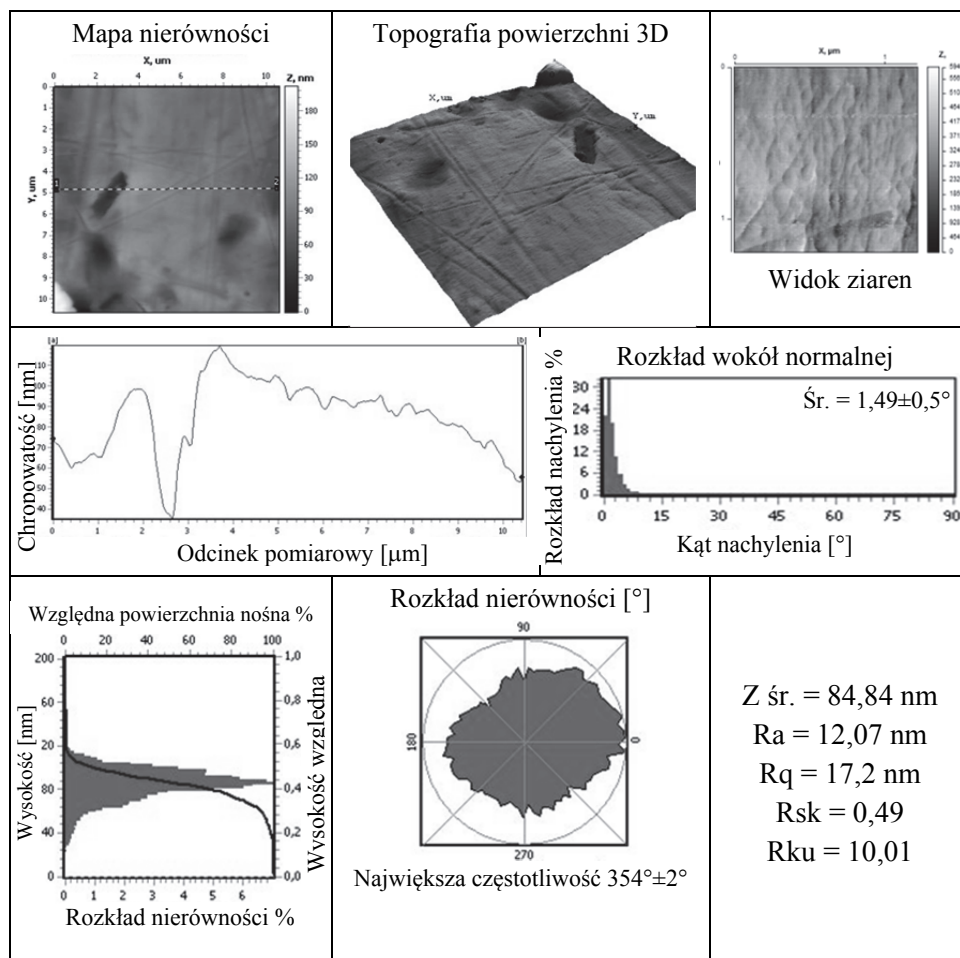
Rys. 4. Wybrane parametrów chropowatości powierzchni po toczeniu na tokarce konwencjonalnej i nagniataniu

Fig. 4. Chosen roughness parameters of surface after turning process on the conventional lathe and after burnishing

4. Nanochropowatość powierzchni obrabianej

Analizując chropowatość powierzchni nagniatanej w odniesieniu do pojedynczej nierówności wykorzystać można mikroskopię sił atomowych. Możliwe wówczas staje się przejście ze skali mikro do skali nano. Pomiar na mikroskopie sił atomowych (NT 206) wykonano w trybie kontaktowym na środku nagniecionej nierówności. Przykładowe wyniki dla powierzchni wałka ze stali Duplex przygotowanych w obróbce poprzedzającej toczeniem przedstawiono w tabeli 1. Zamieszczono w nich mapy topografii powierzchni, trójwymiarowy wykres nierówności, profil powierzchni z parametrami chropowatości w wybranym przekroju oraz niektóre wielkości określające właściwości chropowatości powierzchni w tym: rozkład wysokości chropowatości i krzywej względem powierzchni nośnej, orientację w stosunku do normalnej do powierzchni, rozkład kąta nachylenia do normalnej. Zmniejszając obszar pomiaru możliwe staje się nawet dostrzeżenie ziaren materiału obrobionego.

Tabela 1. Wyniki pomiarów powierzchni stali Duplex na mikroskopie AFM
Table 1. Results of surface measurement on the AFM microscope



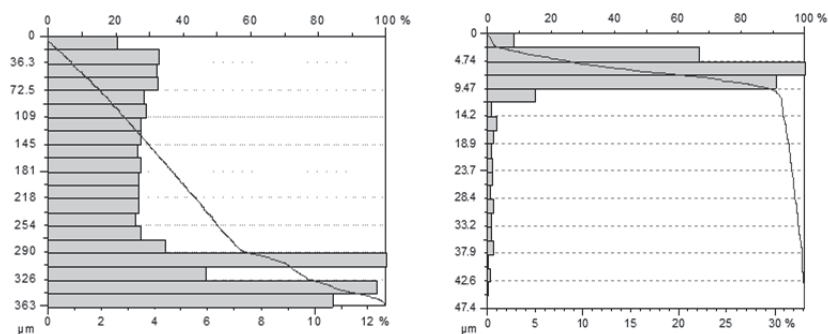
W tabeli 1 chropowatość powierzchni przedstawiono w formie mapy nierówności. Wartości na osiach OX i OY wyrażane są w mikrometrach [μm], natomiast wynik parametrów chropowatość podawany jest w nanometrach [nm]. Prezentowany przykładowy obszar pomiaru wynosił $10 \times 10 \mu\text{m}$ oraz $1,2 \times 1,2 \mu\text{m}$ w przypadku obserwacji ziaren materiału nagniecionego przy zachowaniu rozdzielczości 256×256 punktów pomiarowych. W analizie pominięto krzywiznę powierzchni walcowej wałka rzutując ją na płaszczyznę. Zobrazowano również wyniki w postaci trój-

wymiarowego wykresu chropowatości powierzchni, gdzie widoczne są mikro czy wręcz nano wgłębienia powierzchni. Mimo, że wydają się one znaczne, w rzeczywistości wynoszą od kilku do kilkudziesięciu nanometrów. Wyznaczone wartości parametrów chropowatości dla zbadanych powierzchni wynoszą $R_a = 12,07$ nm, natomiast $R_q = 17,2$ nm, zaś suma wartości maksymalnej chropowatości dodatniej i wartości bezwzględnej chropowatości ujemnej wynosi $\Delta Z_{\max} = 84,84$ nm. Wśród wyników przedstawiono również funkcje rozkładu wysokości chropowatości dla obszaru powierzchni wałka oraz rozkład, mówiący o orientacji nierówności (wzniesień i zagłębień) w stosunku do normalnej (prostopadłej do linii średniej) do badanej powierzchni tej samej próbki i rozkład kąta nachylenia nierówności w stosunku do normalnej do powierzchni próbki. Wartość wysokości nierówności oraz jej ułożenie mogą mieć wpływ na właściwości tribologiczne części. Uzyskane wyniki mogą więc mieć istotne znaczenie przy projektowaniu części maszyn i tworzeniu dla nich poprawnych matematycznych modeli.

5. Udział materiałowy powierzchni obrabianej

Obróbka nagniataniem pozwala uzyskać po procesie nie tylko powierzchnie o dużej gładkości, ale także powoduje wzrost udziału materiałowego profilu. Krzywa materiałowa zależy od kształtu nierówności powierzchni. Z punktu widzenia własności użytkowych powierzchni obrabianych (ścieralność) pożądane są profile powierzchni o nośności progresywnej (Przybylski 1987).

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe wykresy udziału materiałowego po toczeniu i po nagniataniu. Powierzchnie obrobione metodą nagniatania mają większy udział materiałowy niż obrabiane toczeniem. W analizowanych przypadkach krzywe nośności powierzchni po obróbce poprzedzającej były proporcjonalne. Po nagniataniu tych powierzchni krzywe nośności określono jako progresywne.

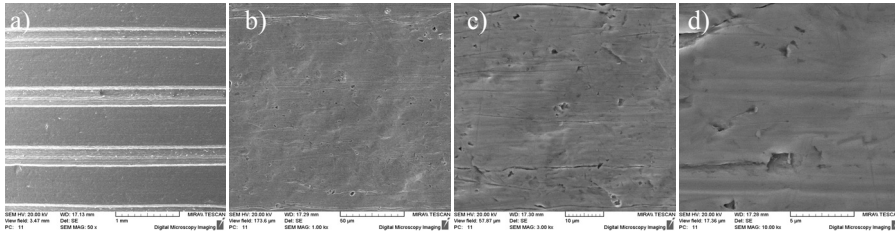


Rys. 5. Udział materiałowy powierzchni przygotowanej w obróbce poprzedzającej toczeniem na tokarce konwencjonalnej (a) a następnie nagniatanej (b)

Fig. 5. Material bearing of the surface after turning process (a) and after burnishing (b)

6. Mikrostruktura powierzchni obrabianych

Badania mikrostruktury stanu powierzchni nagniatanej wykonano poprzez analizę fotografii mikroskopowych obrazujących zmiany, jakie zaszły na powierzchni obrobionego materiału. W tym celu wykorzystano elektronowy skaningowy mikroskop Tescan Mira. Wyniki przedstawiono w postaci obrazów, kolejno dla powiększeń: 50x, 1.00kx, 3.00kx, 10.00kx. W wyniku obróbki toczeniem powstaje ukierunkowana struktura geometryczna powierzchni, będąca skutkiem odwzorowania ostrza noża tokarskiego, posiadająca głębokie szczeliny pomiędzy nierównościami oraz płaszczyzny nieciągłości. Nagniatanie powierzchni z regularnymi, zdeteminowanymi, symetrycznymi nierównościami powoduje powstanie nowej struktury. W analizowanych przypadkach powierzchni nagniatanych (przygotowanych toczeniem), widoczne są wyraźne ślady w postaci mikroszczelin między nierównościami, co jest zgodne z teorią (Kukielka i in. 2016), ponieważ nierówności przygotowane pod nagniatanie charakteryzowały się kątami wierzchołkowymi $\theta = 90^\circ$ i skokiem 1 mm.

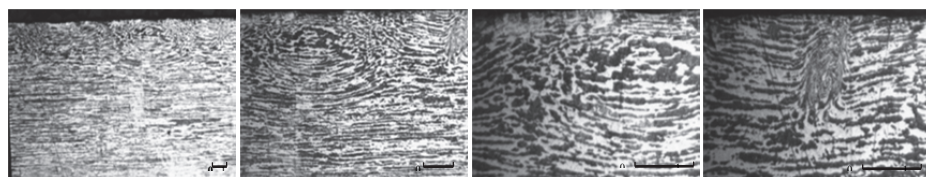


Rys. 6. Zdjęcie mikroskopowe powierzchni nagniatanej stali Duplex przygotowanej w obróbce poprzedzającej toczeniem na tokarce konwencjonalnej z powiększeniem: 50x (a), 1.00kx (b), 3.00kx (c), 10.00kx (d)
Fig. 6. Photos of the steel Duplex surface prepared in turning process on the conventional lathe and then burnished with zoom: 50x (a), 1.00kx (b), 3.00kx (c), 10.00kx (d)

Kolejne powiększenia wykonywano dla obszaru stanowiącego środek nierówności po nagniataniu i charakteryzowały się one znaczną gładkością i jednorodnością struktury. Dostrzec można rysy po przejściu rolek nagniatających, kierunek płynięcia materiału w warstwie wierzchniej wskutek obróbki nagniataniem czy kierunek poprzeczny wgłębień w materiale. Struktura powierzchni wałków ze stali Duplex pod względem jednorodności i gładkości powierzchni wykazuje dobre właściwości. Wyraźnie widać, że uzyskano po nagniataniu powierzchnię ukierunkowaną z mikroszczelinami oraz obszarami wskazującymi na zawalcowania.

7. Struktura metalograficzna warstwy wierzchniej po nagniataniu

Na ukształtowaną nagniataniem strukturę metalograficzną warstwy wierzchniej (Legutko i in. 2004) wpływ mają przede wszystkim: sposób nagniatania, wartości parametrów technologicznych procesu oraz rodzaj materiału i rodzaj obróbki poprzedzającej. Wśród efektów nagniatania w warstwie wierzchniej wymienić można: ukierunkowanie i rozdrobnienie ziarn, tekstura, rozpad austenitu szczątkowego, wydzielenie węglików i inne przemiany fazowe (Przybylski 1987). Zdjęcia wykonano przy wykorzystaniu mikroskopu optycznego Planar Micro 200.



Rys. 7. Zdjęcie metalograficzne warstwy wierzchniej stali Duplex po nagniataniu (pow. 100x, 200x, 400x)

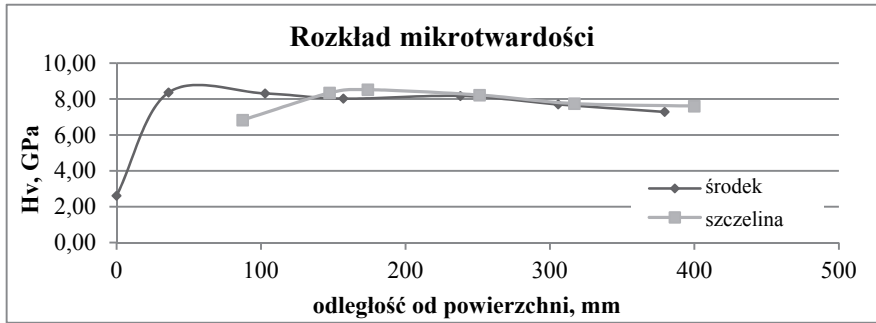
Fig. 7. Metallographic photos of the surface layer of the steel Duplex after burnishing (zoom 100x, 200x, 400x)

Po nagniataniu stali Duplex powstaje specyficznie ukierunkowana warstwa włóknista o największej koncentracji w strefie przypowierzchniowej. Pod wpływem oddziaływania narzędzia nagniatającego powstaje tekstura w wyniku przemieszczania się cząstek materiału w kierunku największego odkształcenia. W przypadku struktury austenityczno-ferrytycznej stali Duplex materiału obrabianego przedmiotu charakterystyczne jest tworzenie się drobnoziarnistej, bezpostaciowej i trudnej do trawienia warstwy podpowierzchniowej, zawierającej wydzielenia węglików. Grubość tej warstwy obejmuje swoim zasięgiem całą nierówność nagniataną oraz sięga w rdzeń materiału obrabianego. Ziarna austenitu i ferrytu tworzą na pewnej głębokości gniazda, wokół których rozchodzą się łuki spłaszczonych ziarn austenitu i ferrytu. Łuki te ułożone są najpierw wypukłością ku górze, następnie występuje "gniazdo" i patrząc w głąb od powierzchni obrobionej wypukłością ku dołowi.

8. Mikrotwardość nagniatanej warstwy wierzchniej

Na podstawie analizy wielkości i rozkładu otrzymanych w wyniku procesu obróbki zmian rozkładu mikrotwardości można wnioskować o przebiegu zachodzącego procesu. Badania mikrotwardości wykonano na twardościomierzu PTM-300M. Zastosowano metodę Vickersa, polegającą na wciskaniu w badany materiał regularnego czworokątnego ostrosłupa diamentowego o kącie dwuściennym między przeciwległymi ścianami wynoszącym 136° , pod obciążeniami P . Czas działania siły wynosił 15 [s] zaś zakres pomiarowy $500 \mu\text{m}$. Następnie, uzyskane wartości mikrotwardości zamieniono na jednostki układu SI, a wyniki przedstawiono w GPa. Na wykresach zamieszczonych na rysunku 8 przedstawiono mikrotwardość po nagniataniu w zależności od odległości od po-

wierzchni. Pomiary wykonano wzdłuż środka nierówności oraz od wgnębień pomiędzy nierównościami.



Rys. 8. Mikrotwardość powierzchni nagniatanych
Fig. 8. Microhardness of the burnished surface

9. Podsumowanie

Spśród dużej liczby znanych obecnie sposobów obróbki, największe możliwości kształtowania wyrobu o zróżnicowanej jakości technologicznej posiadają sposoby nagniatania. Nagniatanie wyrobu wykonanego z określonego materiału powoduje tworzenie pewnej jakości technologicznej, która z kolei, zapewnia powstanie określonych właściwości użytkowych wyrobu.

Ekoinnowacyjna obróbka nagniataniem daje możliwość otrzymania przedmiotu o dużej gładkości powierzchni połączonej z umocnieniem mechanicznym warstwy wierzchniej oraz konstytuowania w niej naprężeń ściskających, powodując zwiększenie odporności na zużycie w warunkach eksploatacyjnych. Zastosowanie obróbki nagniataniem pozwoli podnieść jakość uzyskiwanych wyrobów i zmniejszenie odpadów materiałowych (obróbka bezwiórowa, bezpyłowa). Spowoduje to bezpośrednio zmniejszenie zużycia energii i przyczyni się do ograniczenia negatywnego wpływu tego procesu na otaczające środowisko.

Literatura

- Adamczyk, W. (2004). *Ekologia wyrobów*. PWE.
- Baran, J., Ryszko, A. (2013). Opracowywanie i wdrażanie ekoinnowacji technicznych a ekoprojektowanie – integracja procesów i wskazówki metodyczne ich realizacji, *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, 34-46.
- Bohdal, Ł., Walczak, P. (2013). Eco-modeling of metal sheet cutting with disc shears. *Annual Set The Environment Protection*, 15, 863-872.
- Bohdal, L., Kukielka, L. (2014). Application of variational and FEM methods to the modelling and numerical analysis of guillotining process for geometrical and physical nonlinearity. *Mechanika*. 20 (2), 197–204.
- Bohdal, L., Kulakowska, A., Patyk, R., Kulakowski, M. (2016). Numerical Investigations of the Effect of Process Parameters on ResidualStresses, Strains and Quality of Final Product in Blanking Using SPH Method, *Novel Trends in Production Devices and Systems, "Materials Science Forum"* (in press).
- Bohdal, Ł., Kulakowska, A., Patyk, R. (2014). Analysis of slitting of aluminium body panels in the aspect of scrap reduction, *Annual Set The Environment Protection*, 16, 105-114.
- Bohdal, L., Kukielka, L., Kukielka, K., Kulakowska, A., Malag, L., Patyk, R. (2014). Three Dimensional Finite Element Simulation of Sheet Metal Blanking Process. *Applied Mechanics and Materials*, 474, 430-435.
- Chodor, J., Kaldunski, P. (2016). Numerical Analysis of Influence of Cutting Edge Radius on the Minimum Thickness of the Machined Layer, *Novel Trends in Production Devices and Systems, "Materials Science Forum"* (in press).
- Chodor, J., Kukielka, L. (2014). Using Nonlinear Contact Mechanics in Process of Tool Edge Movement on Deformable Body to Analysis of Cutting and Sliding Burnishing Processes. *Applied Mechanics and Materials*, 474, 339-344.
- Kaldunski, P (2016). Plane anisotropy parameters identification based on Barlat's model, *Advances in Mechanics: Theoretical, Computational and Interdisciplinary Issues – Kleiber et al.*, CRC Press/Balkema, 275-278.
- Kaldunski, P., Kukielka, L. (2014). Numerical Analysis and Simulation of Drawpiece Forming Process by Finite Element Method. *Applied Mechanics and Materials*, 474, 153-158.
- Kukielka, L. (2001). Mathematical modelling and numerical simulation of non-linear deformation of the asperity in the burnishing cold rolling operation. *Computational Methods in Contact Mechanics V Book Series: Computational and experimental methods*, 317-326.
- Kukielka, K., Kukielka, L. (2013). External thread rolling head. *The polish patent No PL402652-A1, PL220175-B1*, z dn. 4.02.2013. (in polish)

- Kukielka, L., Kulakowska, A., Patyk, R. (2010). Numerical modeling and simulation of the movable contact tool-workpiece and application in technological processes, *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, 8 (3), 36-41.
- Kukielka, L., Kustra, J., Kukielka, K. (2005). Numerical analysis of states of strain and stress of material during machining with a single abrasive grain. *Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Effects and Contact Mechanics VII*, WITPRESS. Southampton-Boston, 57-66.
- Kukielka, L., Kustra, J. (2003). Numerical analysis of thermal phenomena and deformations in processing zone in the centerless continuous grinding process, *Computer Methods and Experimental Measurements for Surface treatments Effects VI*, WITPRESS. Southampton-Boston, 7, 109-118.
- Kukielka, L., Szczesniak, M., Patyk, R., Kulakowska, A., Kukielka, K., Patyk, S., Gotowała, K. Kozak, D. (2016). Analysis the states of deformation and stress in the surface layer of the product after the burnishing cold rolling operation, *Novel Trends in Production Devices and Systems, "Materials Science Forum"* (in press).
- Kulakowska, A. (2012). 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.
- Kulakowska, A., Kukielka, L., Kukielka, K., Patyk, R., Malag, L., Bohdal, L. (2014). Possibility of Steering of Product Surface Layers Properties in Burnishing Rolling Process. *Applied Mechanics and Materials*. 474, 442-447.
- Kulakowska, A., Kulakowski, M., Bohdal, L., Patyk, R. (2016). Aspects of Burnishing Rolling Process of the Surface Prepared in Different Previous Treatments, *Novel Trends in Production Devices and Systems, "Materials Science Forum"* (in press)
- Kulakowska, A., Patyk, R., Bohdal, Ł. (2014). Zastosowanie obróbki nagniataniem w tworzeniu ekologicznego produktu, *Annual Set The Environment Protection*, 16, 323-335.
- Kukielka, L., Kukielka, K., Kulakowska, A., Patyk, R., Malag, L., Bohdal, L. (2014). 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*, 474, 159-165.
- Kukielka, K., Kukielka, L., Bohdal, L., Kulakowska, A., Malag, L., Patyk, R. (2014). 3D Numerical Analysis the State of Elastic/Visco-Plastic Strain in the External Round Thread Rolled on Cold. *Applied Mechanics and Materials*, 474, 436-441.

- Kukielka, L., Geleta, K., Kukielka, K. (2012). Modelling of Initial and Boundary Problems with Geometrical and Physical Nonlinearity and its Application in Burnishing Processes. *Steel Research International. Special Edition: 14th International Conference Metal Forming*, 1375-1378.
- Legutko, S., Nosal, S. (2004). *Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej części maszyn*. Poznań: Ośrodek Wydawnictw Naukowych.
- Malag, L., Kukielka, L., Kukielka, K., Kulakowska, A., Bohdal, L., Patyk, R. (2014). Problems Determining of the Mechanical Properties of Metallic Materials from the Tensile Test in the Aspect of Numerical Calculations of the Technological Processes. *Applied Mechanics and Materials*, 474, 454-459.
- Myslinski, P., Precht, W., Kukielka, L, et al. (2004). A possibility of application of MTDIL to the residual stresses analysis – The hard coating-substrate system. *Journal of Thermal Analysis And Calorimetry*, 77 (1), 253-258.
- Patyk, R., Bohdal, L., Kulakowska, A. (2016). Study the Possibility of Controlling the Magnitude and Distribution Of Residual Stress in the Surface Layer of The Product After The Process Double Duplex Burnishing, *Novel Trends in Production Devices and Systems, "Materials Science Forum"* (in press)
- Patyk, R. (2012). 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*.
- Patyk, R., Kulakowska, A., Bohdal, L. (2014). Ekologiczne, ekonomiczne i eksploatacyjne aspekty stosowania obróbki nagniataniem, *Annual Set The Environment Protection*, 16, 351-362.
- Przybylski, W. (1987). *Technologia obróbki nagniataniem*. Warszawa: WNT.
- Patyk, R., Kukielka, L., Kukielka, K., Kulakowska, A., Malag, L., Bohdal, L. (2014). Numerical Study of the Influence of Surface Regular Asperities Prepared in Previous Treatment by Embossing Process on the Object Surface Layer State after Burnishing. *Applied Mechanics and Materials*, 474, 448-453.
- Tse, PW., Gontarz, S., Wang, XJ. (2007). Enhanced eigenvector algorithm for recovering multiple sources of vibration signals in machine fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing* 21 (7), 2794-2813.

Chosen Aspects of Ecoinnovative Burnishing Process

Abstract

The aim of this article is to demonstrate the possibility of using eco-innovative burnishing rolling process as the technology of product development. Burnishing rolling process is effective: technologically, economically and environmentally way of treatment of the machine's outer layers. This approach will make possible the production of parts with minimal loss in material and energy. In order to demonstrate the ability to create products in the ecoinnovative treatment of burnishing rolling, the experimental researches were carried out, showing the ability to form the surface layer of the product with the desired properties. Among the examined certain aspects were considered: surface roughness, nano-roughness, material bearing, surface microstructure, metallographic structure and microhardness.

Streszczenie

Celem artykułu jest wykazanie możliwości zastosowania ekoinnowacyjnej technologii obróbki nagniataniem w procesie tworzenia produktu. Obróbka nagniataniem jest efektywną technologicznie, ekonomicznie i ekologicznie metodą wytwarzania warstw wierzchnich części maszyn. Takie podejście umożliwi produkcję części z minimalnymi stratami materiałowymi oraz energetycznymi. W celu wykazania możliwości tworzenia produktu w ekoinnowacyjnej obróbce nagniataniem przeprowadzono badania eksperymentalne procesu nagniatania naporowo-tocznego wykazujące możliwość kształtowania warstwy wierzchniej wyrobu o pożądanym właściwościach. Wśród rozpatrywanych wybranych aspektów rozpatrywano: chropowatość powierzchni, nanochropowatość, udział materiałowy, mikrostrukturę powierzchni, strukturę metalograficzną oraz mikrotwardość.

Słowa kluczowe:

obróbka nagniataniem, ekoinnowacyjność, mikrotwardość

Keywords:

burnishing rolling process, eco-innovative, microhardness