

OBRÓBKA NAGNIATANIEM STALI DUPLEX W ASPEKTCIE JAKOŚCI WYROBU

W pracy omówiony został proces nagniatania naporowego tocznego powierzchni wałków ze stali Duplex. Powierzchnie do nagniatania przygotowano w procesie toczenia. Charakteryzowały się one nierównościami powierzchni o kącie $\theta=90^\circ$. Następnie powierzchnie nagniatano na głębokość równą $\frac{1}{2}$ wysokości nierówności. Wykonano pomiary powierzchni i określono parametry chropowatości po obróbce poprzedzającej (toczeniu) oraz po nagniataniu. Przedstawiono wyniki pomiarów w postaci profilometrów, udziału materiałowego oraz zdjęć mikrostruktury.

WSTĘP

Głównym problemem we współczesnych technikach wytwarzania jest zagadnienie poprawiania jakości technologicznej wyrobu przy jednoczesnej minimalizacji kosztów. Na jakość użytkową wyrobu największy wpływ ma warstwa wierzchnia, która źle ukształtowana jest przyczyną powstawania ponad 80% uszkodzeń części, ponadto może być przyczyną wzrostu oporów, a przez to i utraty energii o ok. 50%. Istnieje zatem potrzeba, żeby jako obróbki wykończeniowe części stosować takie technologie, które wydatnie poprawiają właściwości warstwy wierzchniej bez jednoczesnego wzrostu kosztów wytwarzania. Należy również mieć na uwadze, że wymagania stawiane stanom warstwy wierzchniej części samochodowych i dokładności wymiarowo-kształtowej są zróżnicowane, co związane jest to z różnorodnością ich warunków eksploatacji i przeznaczenia. Jedną z obróbek, która może być stosowana w celu rozwiązania tych problemów jest obróbka nagniataniem.

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 [1÷6]. Aktualny wzrost zainteresowania przemysłu tą metodą obróbki, wynika z faktu, że przy zastosowaniu właściwych warunków realizacji procesu możliwe jest uzyskanie jednocześnie wysokiej dokładności wymiarowo-kształtowej, wysokiej gładkości powierzchni i umocnienia, przy niskich kosztach realizacji [7÷16]. Z literatury wiadomo, że najkorzystniejszym zarysem powierzchni pod obróbkę nagniataniem jest zarys regularny, zdeterminowany okresowy [17÷23, 25, 26].

Stal Duplex przez skład chemiczny oraz ferrytyczno-austenityczną mikrostrukturę skupia najlepsze właściwości chromowej stali ferrytycznej i chromowo-niklowej stali austenicyznej. Zawiera ona od 21÷28% Cr, od 3,5÷8% Ni, do 4,5% Mo oraz maksymalnie 0,05% C i do 0,5% N. Charakteryzuje się wysokimi właściwościami mechanicznymi: granicą plastyczności, wytrzymałością na rozciąganie i ciągliwością oraz odpornością na korozję ogólną, wżerową i naprężeniową. Stosunkowo niski, w porównaniu z stalą austenicyzną, koszt wytwarzania stali duplex jest, między innymi efektem obniżonej zawartości deficytowego i drogiego niklu, co stanowi jej kolejną zaletę. Doskonalenie składu chemicznego stali, w kolejnych latach, między innymi w wyniku powiększenia zawartości molibdenu i azotu zwiększyło stabilność jej mikrostruktury i dalszy wzrost jej właściwości. Zastosowanie stali austenicyzno-ferrytycznej, głównie na konstrukcje spawane stało się powodem szczególnego zainteresowania jej spawalnością. Powszechnie

uważa się, że stal duplex należy do stosunkowo łatwo spawalnych. Jednak znane są przykłady poważnych trudności występujących szczególnie podczas spawania konstrukcji o dużych rozmiarach, które doprowadziły do znacznych strat finansowych związanych z koniecznością napraw i dodatkowych badań złączy spawanych [24]. Stal duplex jest wykorzystywana w przypadku przewozu bardzo agresywnych substancji o kwaśnym pH, które łączą właściwości stali ferrytycznych i austenicyznych.

Obróbka nagniataniem zwiększa kilkukrotnie wytrzymałość zmęczeniową części pracujących w warunkach korozyjnych, szczególnie w wodnych roztworach soli. Wynika to z różnic potencjałów elektrycznych między kryształami odkształconymi plastycznie w różnym stopniu, które powodują tworzenie się mikroogniw galwanicznych. Odporność na korozję przedmiotu nagniatanego zależy głównie od dwóch czynników: stopnia zgniotu i wygładzania powierzchni (całkowita eliminacja uszkodzeń powierzchni). Parametrami określającymi odporność na korozję są [17]:

- a) szybkość korozji v_k
- b)

$$v_k = k j_k \quad (1)$$

k – równoważnik elektrochemiczny

j_k – prąd korozyjny;

- a) wartość ubytku wagowego i objętościowego wskutek korozji;
- b) ilość punktów korozji na określonej jednostce badanej powierzchni.

Parametry charakteryzujące odporność na zatarcie:

- a) wartość siły normalnej dociskającej próbkę do przeciwpróbki, przy której następowało lawinowe zużycie w przyjętym okresie czasu;
- b) czas pracy do chwili zatarcia przy stałej wartości siły normalnej [17].

1. BADANIA EKSPERYMENTALNE

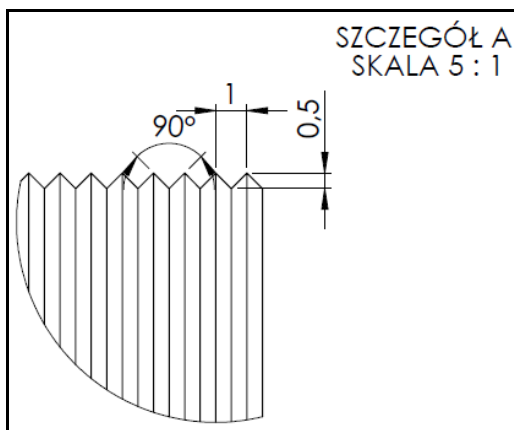
Wszystkie badania zostały przeprowadzone na znormalizowanych maszynach. Użyto nowych narzędzi w celu zminimalizowania wpływu narzędzi na wyniki badań. Obróbkę średnic wałków wykonano w V, zaś powierzchni czołowych w VII klasie dokładności. Średnica detalu obrabianego oraz jego długość była jednakowa we wszystkich przypadkach ($\varnothing = 22.5\text{mm}$ i długości $l = 200\text{mm}$). W trakcie toczenia na tokarce CNC stosowano parametry obróbki: $n=700\text{ obr./min.}$, $v=0,07\text{ mm/s}$, $f=1\text{mm/obr.}$, $a_r=0,5\text{ mm}$ oraz narzędzia skrawające firmy Fenes - typ ISO 2R 2525 P20.

Proces toczenia na tokarce CNC został wykonany na maszynie firmy HAAS Automation, model ST 30, rok produkcji 2013. Głównym

czynnikiem nastawy parametrów była średnica elementu obrabianego oraz jego długość. W celu ukształtowania regularnego, zdefiniowanego zarysu trójkątnego nierówności zastosowano skok 1mm. Widok tokarki numerycznej użytej w badaniach przedstawiono na rysunku 1, zaś teoretyczny zarys nierówności na rysunku 2.



Rys. 1. Obrabiarka CNC stosowana w obróbce poprzedzającej nagniatanie.



Rys. 2. Teoretyczny zarys nierówności powierzchni po procesie toczenia.

Proces nagniatania naporowego tocznego wałków przeprowadzono za pomocą trójkątnej głowicy nagniatącej z dociskiem sztywnym z rolkami firmy – Rafan NUGh 14-27 (rys. 2). Posuw nagniatania równy był posuwowi obróbki poprzedzającej, prędkość obrotowa wyniosła 56 obr./min.



Rys. 3. Widok głowicy nagniatącej.

W obróbce nagniataniem dokonywano tylko jednego przejścia głowicy nagniatącej po powierzchni wałka. Mimo, że wałki wykonane były w tej samej klasie dokładności konieczna była korekta

ustawień rolek w głowicy nagniatącej. Wpływ na to miały: sposób zamocowania wałka względem głowicy, tarcie i dekohezja w strefie obróbki oraz losowe zjawiska dynamiczne – drgania.

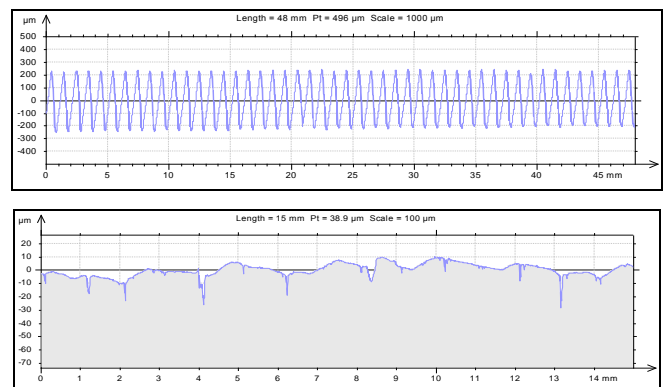
2. WYNIKI

Pomiary chropowatości powierzchni toczonych i nagniatanych przeprowadzono na profilometrze Hommel Tester T8000 (rys. 4) z oprogramowaniem Turbo Chropowatość dla Windows, firmy Hommelwerke GmbH.



Rys. 4. Stanowisko pomiarowe Hommel Tester T8000.

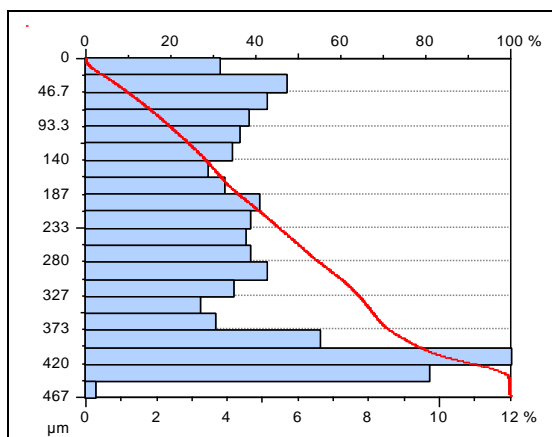
Po procesie toczenia oraz nagniatania naporowego tocznego powierzchnie profilografowano wykonując po trzy pomiary dla każdej powierzchni (rys. 5).



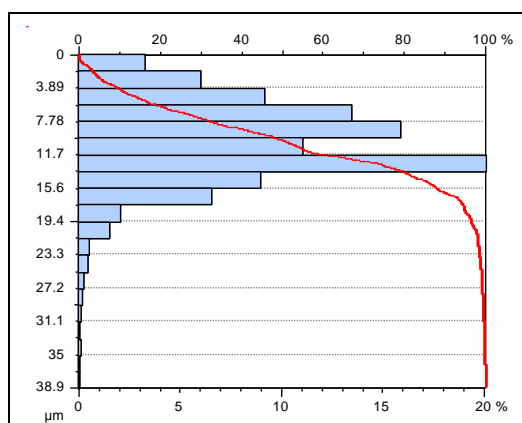
Rys. 5. Profil chropowatości powierzchni po toczeniu na tokarce numerycznej ($l=48$ mm) oraz po nagniataniu ($l=14$ mm).

Mimo, że kąt wierzchołkowy nierówności po procesach 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 $\leq 90^\circ$.

Chropowatość powierzchni rzutuje na nośność powierzchni. Krzywa materiałowa jest źródłem informacji na temat m.in. obszaru rdzenia, obszaru wzniesień wypełnionych materiałem i obszaru wgłębien wolnych od materiału, czyli przede wszystkim parametrów hybrydowych. Udział materiałowy powierzchni po obróbce toczeniem jest mniejszy od tego po obróbce nagniataniem. Zatem nagniatanie powierzchni jest korzystne i wpływa pozytywnie na zużycie ściernie, rośnie jej nośność, czyli wytrzymałość na naciski (rys 6 i 7).

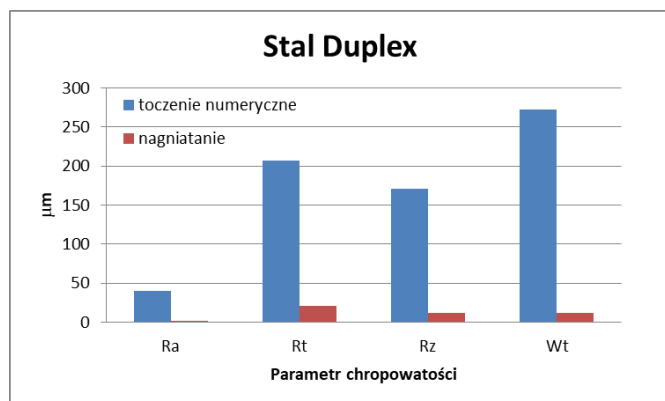


Rys. 6. Udział materiałowy powierzchni po procesie toczenia



Rys. 7. Udział materiałowy powierzchni po procesie nagniatania

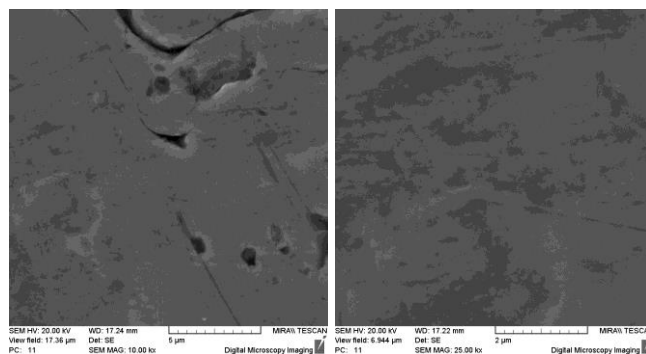
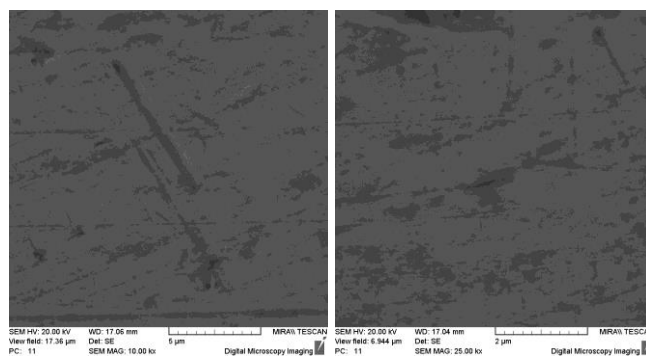
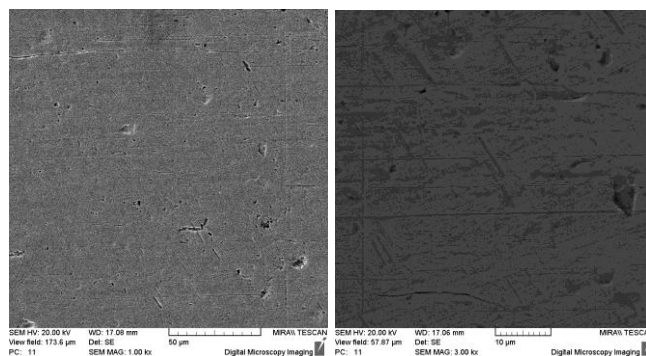
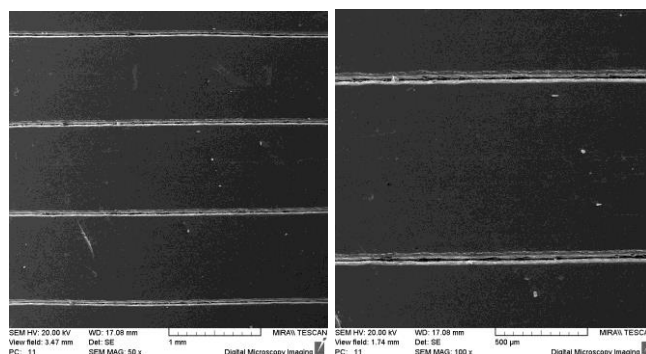
Na rysunku 8 przedstawiono porównawczo wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni po obróbce poprzedzającej (toczenie) oraz po procesie nagniatania.



Rys. 8. Analiza porównawcza wybranych parametrów chropowatości powierzchni po procesie toczenia i nagniatania

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. 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, zdeterminowanymi, symetrycznymi nierównościami powoduje powstanie nowej struktury. Wykonane z różnymi powiększeniami fotografie mikroskopowe (rys. 9) przedstawiają strukturę materiału

uwidaczniając różnej wielkości szczeliny pozostałe po obróbce, co związane jest z różnymi wartościami kątów wierzchołkowych nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej (toczenie).



Rys.9. Zdjęcie mikroskopowe powierzchni warstwy wierzchniej po nagniataniu (stal Duplex, $\theta=90^\circ$)

PODSUMOWANIE

Celem pracy była analiza stanu powierzchni stali Duplex przygotowanej w procesie toczenia na tokarce numerycznej a następnie nagniatanej naporowo tocznie. Przeprowadzono badania ekspery-

mentalne, obejmujące proces toczenia a następnie nagniatania. Powierzchnie próbek ze stali Dulex profilografowano. Przedstawiono wyniki obejmujące zmianę wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni po obu obróbkach oraz udział materiałow. Wykonano również zdjęcia mikroskopowe powierzchni warstwy wierzchniej po nagniataniu ukazując nową strukturę powierzchni powstałą w wyniku nagniatania zdeterminowanych nierówności powierzchni przygotowanych w trakcie procesu toczenia.

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., Kukielka 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. Bohdal L., Kukielka L., Kukielka K., Kułakowska A., Maląg L., Patyk R., *Three Dimensional Finite Element Simulation of Sheet Metal Blanking Process*. Applied Mechanics and Materials 2014, vol. 474, pp. 430-435.
7. Chodor J., Kukielka L., *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, vol. 474, pp. 339-344.
8. Kaldunski P., Kukielka L., *Numerical Analysis and Simulation of Drawpiece Forming Process by Finite Element Method*. Applied Mechanics and Materials 2014, vol. 474, pp. 153-158.
9. 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 2010. Vol. 8/3, pp. 36-41.
10. 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 2008, vol. 2
11. Kułakowska A., *Problems of surface preparation under burnishing rolling in aspect of product quality*. Steel Research International 2010, vol. 81/9.
12. Kułakowska A., *Experimental researches of burnishing rolling process of regular surface asperities prepared in turning process*. Steel Research International 2012. Special Edition, 14th International Conference on Metal Forming, pp. 127-131.
13. Kułakowska A., Kukielka L., Kukielka K., Patyk R., Maląg L., Bohdal L., *Possibility of Steering of Product Surface Layers Properties in Burnishing Rolling Process*. Applied Mechanics and Materials 2014, vol. 474, pp. 442-447.
14. Kułakowska A., Patyk R., Bohdal Ł., *Zastosowanie obróbki nagniataniem w tworzeniu ekologicznego produktu*, Annual Set The Environment Protection Volume 2014, vol. 16
15. 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.
16. Kukielka K., Kukielka L., Bohdal L., Kułakowska A., Maląg L., Patyk R., *3D Numerical Analysis the State of Elastic/Visco-Plastic Strain in the External Round Thread Rolled on Cold*. Applied Mechanics and Materials 2014, vol. 474, pp. 436-441.
17. Przybylski W., *Technologia obróbki nagniataniem*, WNT, Warszawa, 1987
18. Patyk R., Kułakowska A., Bohdal L., *Ekologiczne, ekonomiczne i eksploatacyjne aspekty stosowania obróbki nagniataniem*, Annual Set The Environment Protection Volume, vol. 16
19. Patyk R., Kułakowska A., Nagnajewicz S.: *Badanie wpływu głębokości nagniatania na chropowatość powierzchni wałków stalowych*, Autobusy 12/2017
20. Kułakowska A., Patyk R., Kukielka L., *Problematyka kształtowania technologicznej warstwy technologicznej części w procesie nagniatania powierzchniowego*. Pomiary Automatyka Kontrola 2008, nr 4.
21. Kułakowska A., Kukielka L., *Problematyka przygotowania powierzchni w procesie toczenia w aspekcie jakości technologicznej wyrobu nagniatanego*. Pomiar, Automatyka, Kontrola, PAK 2008, vol. 54, nr 7.
22. Kułakowska A., Kukielka: *Wpływ warunków obróbki toczeniem na parametr chropowatości Ra wyrobu nagniatanego*, Logistyka 2009, nr 3.
23. Kułakowska A., Patyk R., *Poliptymalizacja operacji nagniatania naporowo tocznego*. Pomiar Automatyka Kontrola 2012, nr 10.
24. Nowacki J.: *Stal duplex i jej spawalność*, Przegląd Spawalnictwa, 10/2008
25. Kułakowska A., *Komputerowe modelowanie 3D procesu nagniatania naporowego tocznego części samochodowych*. Logistyka 2011, nr 6.
26. Kułakowska A.: *Modelowanie, analiza i prognozowanie cech i wyników procesu nagniatania naporowego tocznego warstwy wierzchniej o zdeterminowanej strukturze geometrycznej powierzchni*, Monografia nr 307, Politechnika Koszalińska, 2016

Burnishing rolling process of the Duplex steel in the aspect of surface quality

The work discusses the process of burnishing rolling of the surface of Duplex steel rollers. Burning surfaces were prepared in the rolling process. They were characterized by asperities of the surface with angle $\theta = 90^\circ$. Then the surface was burnished to a depth equal to $\frac{1}{2}$ of the asperities height. Surface measurements were made and roughness parameters were determined after pre-treatment (turning) and after burnishing. The results of measurements in the form of profilometers, material bearing and microstructure photos are presented.

Autorzy:

mgr inż. **Marcin Kułakowski** – Katedra Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych, Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, e-mail: marcinkulakowski@wp.pl
 Prof. nzw dr hab. inż. **Agnieszka Kułakowska** – Katedra Automatyki, Mechaniki i Konstrukcji, Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 1517, 75-620 Koszalin, e-mail: agnieszka.kulakowska@tu.koszalin.pl

JEL: L64 DOI: 10.24136/atest.2018.127

Data zgłoszenia: 2018.05.23 Data akceptacji: 2018.06.15