

WPŁYW ZMIANY GŁĘBOKOŚCI SKRAWANIA NA WARTOŚĆ SIŁ SKRAWANIA I PARAMETR CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI PODCZAS TOCZENIA CZOPÓW WAŁÓW

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu zmiany głębokości skrawania na wartość sił skrawania oraz parametr chropowatości powierzchni czopów wałów. Badania przeprowadzono na wałku o średnicy 50 mm wykonanym ze stali konstrukcyjnej S235JR. Proces toczenia czopów wału przeprowadzono na tokarce uniwersalnej kołowej CU500MRD. Podczas badań wykorzystano nóż tokarski z wymienną płytką skrawającą CCMT09T304 PF. Natomiast pomiar sił skrawania podczas toczenia rejestrowano przy użyciu siłomierza firmy Kistler. Pomiar parametrów chropowatości wykonano na profilometrze W20. Do badań wykorzystano również współrzędnościową optyczną maszynę pomiarową Baty Venture Plus oraz optyczny spektrometr emisyjny Solaris.

Słowa kluczowe: siły skrawania, parametr chropowatości powierzchni, toczenie wykończeniowe.

WPROWADZENIE

Jednym z najważniejszych etapów prognozowania zadań na rzecz podniesienia jakości użytkowej maszyn i urządzeń jest rozwój metod sterowania ich cechami trwałościowo-niezawodnościowymi. Obiekt musi poprawnie spełniać swoje zadania w określonych warunkach i czasie [11]. Badania wykazują, że blisko 80% uszkodzeń części maszyn ma swój początek w warstwie wierzchniej wyrobu, a 50% energii kinetycznej traci się na pokonanie oporów tarcia [12]. Proces wytwarzania części maszyn wiąże się z konstytuowaniem na powierzchni obrabianego materiału technologicznej warstwy wierzchniej (TWW). Odpowiednia konstrukcja, materiał i technologia wytwarzania powinny zapewnić żądany stan początkowy elementu obrabianego [2, 3]. Najbardziej rozpowszechnionym i uniwersalnym sposobem usuwania warstwy nadmiaru materiału jest proces skrawania. Do podstawowych metod kształtowania warstwy wierzchniej czopów wałów zalicza się procesy toczenia wykończeniowego, szlifowania lub nagniatania.

Prawidłowo wytworzona warstwa wierzchnia w technologicznych procesach produkcyjnych oraz procesach eksploatacyjnych zapewnia maksymalną wytrzymałość powierzchniową, która przenosi się na dużą trwałość eksploatacyjną. Pod wpływem oddziaływania wymuszeń tribologicznych i aktywnego środowiska TWW ulega ewolucyjnemu przekształceniu w EWW. Dlatego pojęcie eksploata-

cyjnej warstwy wierzchniej (EWW) znalazło powszechne zastosowanie w inżynierii powierzchni i tribologii. Kształtowanie EWW przebiega często w niesterowalnych warunkach i nie w pełni poznanych, ale powinno przebiegać w kierunku ich korzystnej poprawy [1, 2, 3].

Podstawowymi cechami warstwy wierzchniej (WW), które mają zdecydowany wpływ na właściwości użytkowe części maszyn, są [10]:

- chropowatość powierzchni;
- skład chemiczny i struktura WW;
- skład chemiczny i budowa warstw tlenkowych;
- umocnienie WW;
- rozkład naprężeń;
- wielkość i rozkład: wtrąceń, nieciągłości i wad struktury.

Wymienione właściwości użytkowe elementów maszyn można kształtować przez odpowiedni dobór technologii obróbki wykończeniowej. Wiele ośrodków naukowych, w tym Akademia Morska w Gdyni, prowadzi badania związane z obróbką materiałów trudno obrabialnych [4, 5, 6, 7, 8, 9, 13].

Realizowane badania mają na celu określenie zbioru czynników wejściowych, stałych i zakłócających dla procesu toczenia wykończeniowego czopów wałów wykonanych ze stali nierdzewnej, mających wpływ na wartości sił skrawania, jak również na strukturę geometryczną powierzchni (SGP).

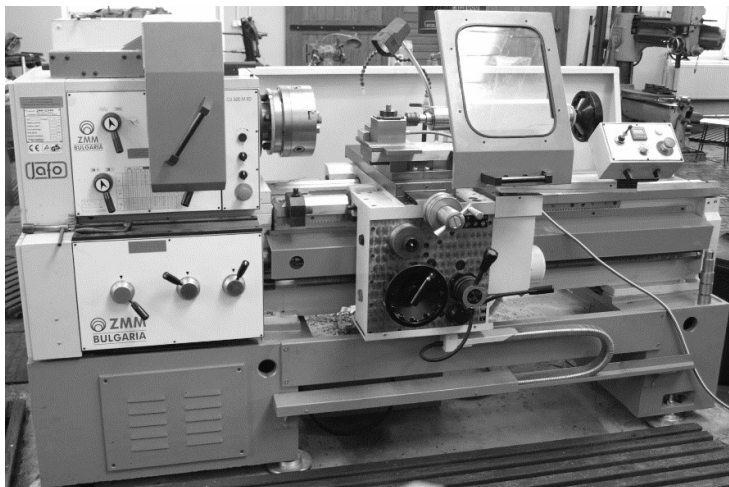
W artykule przedstawiono badania wstępne wpływu zmiany głębokości skrawania dla toczenia stali konstrukcyjnej zwykłej jakości S235JR z wykorzystaniem płytki o promieniu naroża 0,4 mm. Celem badań było określenie możliwości pomiarowych siłomierza firmy Kistler na zaprojektowanym i wykonanym imaku dwupozycyjnym. Siłomierz jest w wyposażeniu Wydziału Mechanicznego Akademii Morskiej w Gdyni. Wykorzystana płytka CCMT09T304 PF umożliwia toczenie z głębokością skrawania w zakresie od 0,11 do 2 mm.

1. METODYKA BADAŃ

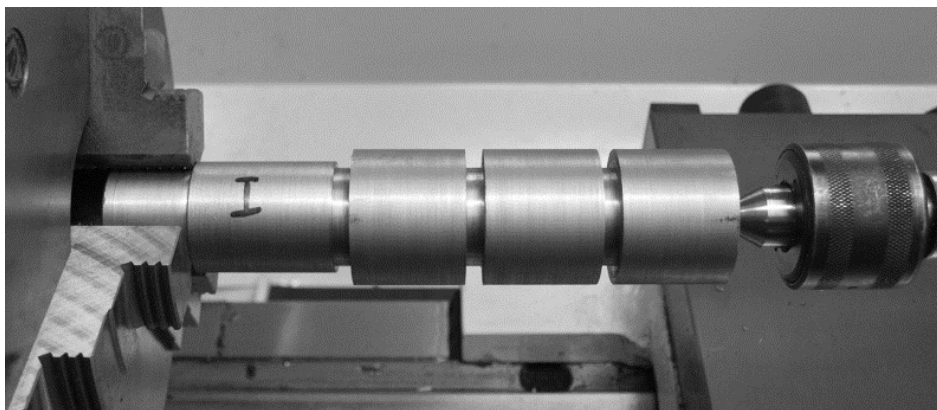
Proces toczenia wykończeniowego czopów wału o średnicy 50 mm przeprowadzono na tokarce CU500MRD (rys. 1).

Na rysunku 2 przedstawiono przykładową próbkę użytą w badaniach, wykonaną ze stali S235JR. Do procesu skrawania wykorzystano wymienną płytkę wieloostrzową CCMT09T304 PF firmy Sandvik. Podczas procesu toczenia wykończeniowego zastosowano parametry skrawania, takie jak: prędkość skrawania $V_c = 150$ m/min, posuw $f = 0,107$ mm/obr oraz głębokość skrawania $a_p = 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75$ mm.

Urządzenia pomiarowe wykorzystane w badaniach pochodzą z projektu pt.: „Rozbudowa infrastruktury dydaktycznej Akademii Morskiej w Gdyni” zrealizowanego w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko 2007–2013.

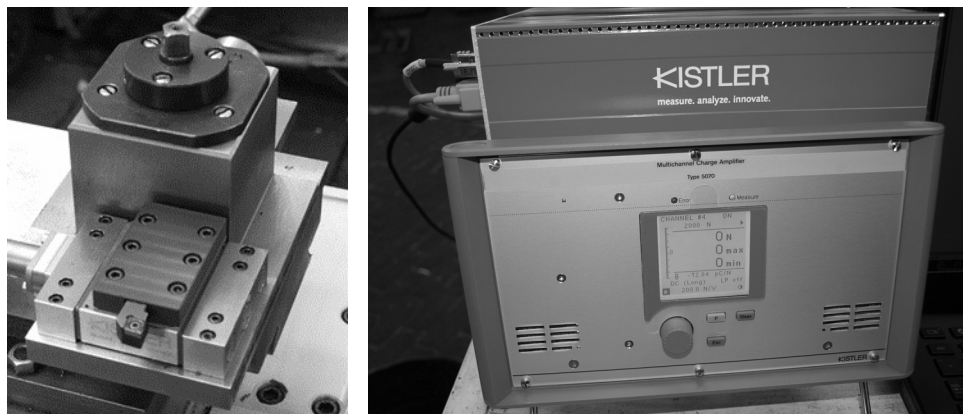


Rys. 1. Tokarka CU500MRD
Fig. 1. Lathe by CU500MRD type



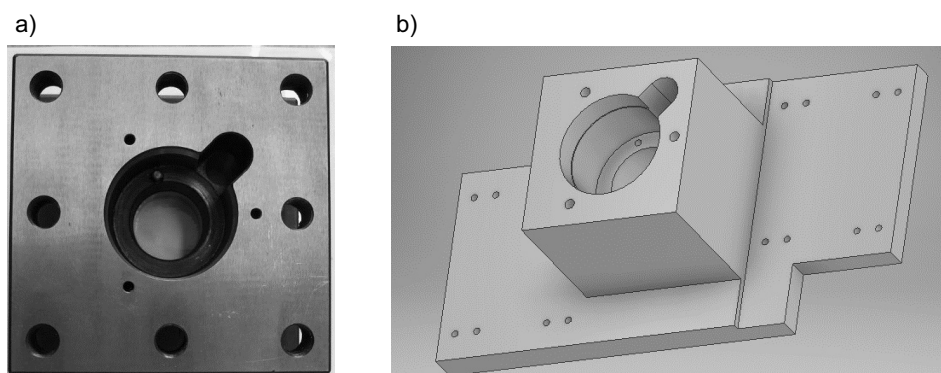
Rys. 2. Przykładowy wałek użyty w badaniach
Fig. 2. The sample used in research

Do procesu toczenia wykorzystano siłomierz firmy Kistler, który przedstawiono na rysunku 3. Podczas obróbki toczeniem rejestrowane są: F_c – siła skrawania, F_f – siła posuwowa oraz F_p – siła odporowa. Urządzenie do pomiaru sił skrawania przeznaczone jest do pracy zarówno na tokarkach uniwersalnych, jak i na maszynach CNC. Podczas pomiarów sił skrawania istotną rolę odgrywa zapewnienie odpowiedniej sztywności całego układu pomiarowego. Dlatego konieczne było wykonanie imaka, dostosowanego do prawidłowego mocowania siłomierza na tokarce konwencjonalnej. Na podstawie imaka nożowego dostarczonego z tokarką CU500MRD (rys. 4a) zaprojektowano i wykonano imak dwupozycyjny (rys. 4b) pod oprawki tokarskie o przekrojach trzonka 12×12 mm oraz 16×16 mm.



Rys. 3. Zestaw do pomiaru sił skrawania firmy Kistler

Fig. 3. Set for measuring of cutting forces by Kistler



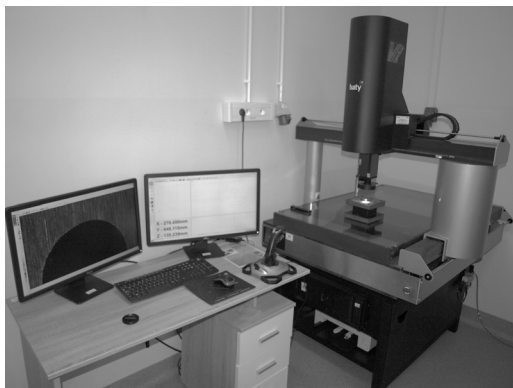
Rys. 4. a) Bazowy imak nożowy, b) imak pod siłomierz

Fig. 4. a) Basic tool holder, b) the tool holder for dynamometer

Pomiary wymiarów imaka bazowego wykonano na optycznej maszynie pomiarowej CNC firmy BATY (rys. 5). Współrzędnościowa maszyna pomiarowa Venture Plus pozwala na przeprowadzenie kompleksowych pomiarów poprzez zastosowanie kombinacji pomiarów stykowych i optyki, co umożliwia znaczne skrócenie czasu pomiaru.

Analizę składu chemicznego materiału, z którego wykonano imak, przeprowadzono na spektrometrze Solaris-CCD PLUS (rys. 6a). Jest to optyczny spektrometr emisyjny ze wzбудzeniem iskrowym firmy GNR. Umożliwia wykonanie analizy stałych próbek metalowych oraz stopów o różnych osnowach.

Pomiary parametru chropowatości powierzchni Ra czopów wałów wykonano na profilometrze stykowym Hommel-Etamic W20 (rys. 6b).



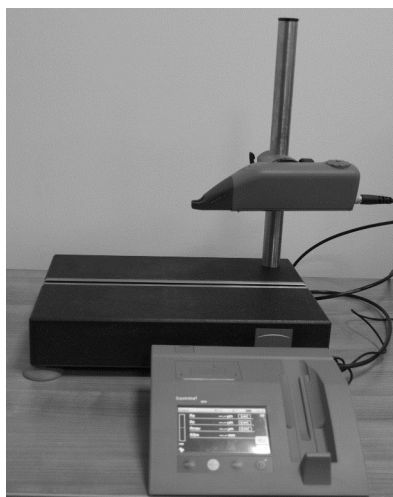
Rys. 5 Optyczna maszyna pomiarowa CNC – Baty Venture Plus

Fig. 5. *Baty Venture Plus – optical CNC measuring machine*

a)



b)



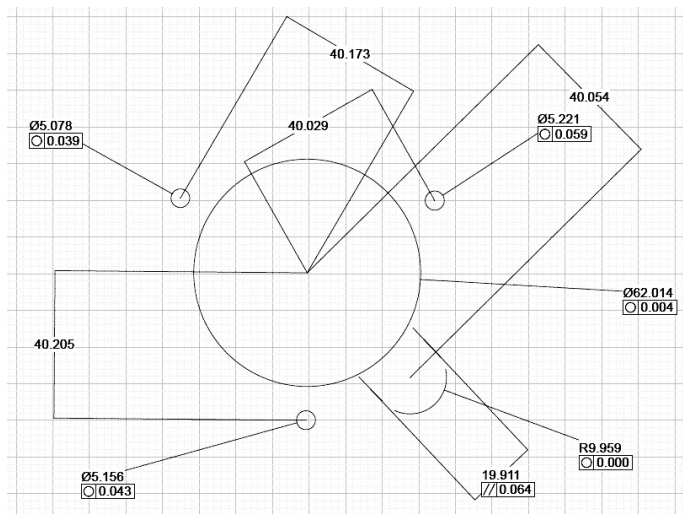
Rys. 6. a) Optyczny spektrometr SOLARIS-CCD PLUS, b) profilometr Hommel–Etamic W20

Fig. 6. a) *SOLARIS-CCD PLUS optical spectrometer, b) Hommel–Etamic W20 profilometer*

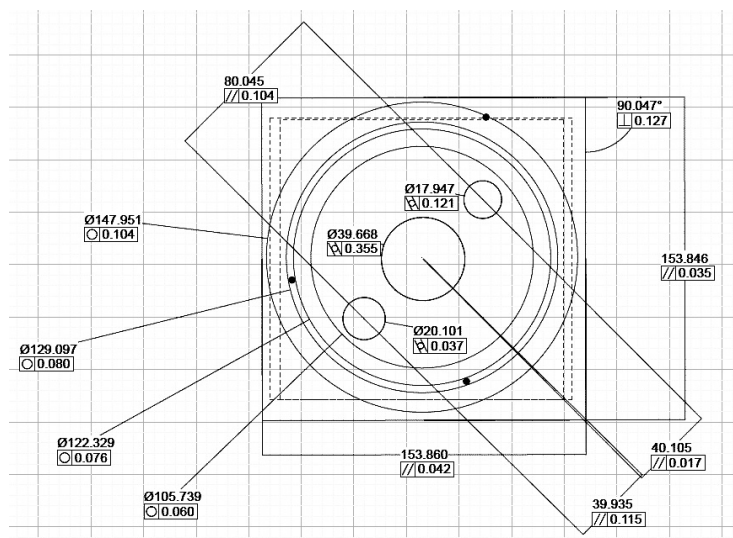
2. WYNIKI BADAŃ

Pierwszy etap badań stanowiło zaprojektowanie i wykonanie imaka, który umożliwi rejestrację pomiaru sił na tokarce konwencjonalnej CU500MRD. Ze względu na wysokiej klasy sprzęt pomiarowy istotną kwestią było zapewnienie dużej sztywności układu pomiarowego. Jednolity imak pod siłomierz wykonano jako dwupozycyjny, a wszystkie wymiary ustalające go na tokarce zmierzono na imaku bazowym. Wykonane pomiary na optycznej maszynie współrzędnościowej przedstawiono na rysunku 7.

a)



b)



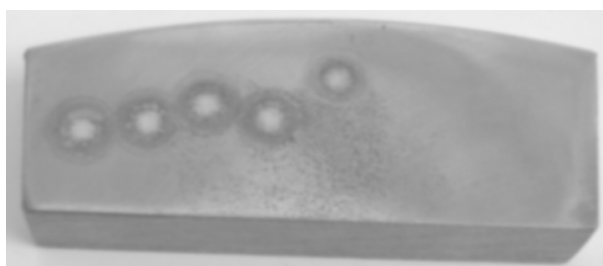
Rys. 7. Pomiary imaka bazowego: a) widok z góry, b) widok z dołu

Fig. 7. Measurements of the basic tool holder: a) view of the top, b) view of the bottom

Średnie wartości uzyskanych wyników pomiarów składu chemicznego dla materiału, z którego wykonany został imak, przedstawiono w tabeli 1. Procentową zawartość poszczególnych pierwiastków w stali podano dla próbki, na której przeprowadzono pięć iskrzeń (rys. 8). Dostarczony materiał na imak nożowy określono jako stal 42CrMo4. Badania wykazały zwiększoną zawartość manganu w stosunku do danych producenta, ale ma to korzystny wpływ na właściwości wytrzymałościowe tego materiału.

Tabela 1. Skład chemiczny stali
Table 1. The chemical composition of steel

Pierwiastek	Wartość	Pierwiastek	Wartość	Pierwiastek	Wartość
C	0,439	Al	0,030	Ca	0,001
Si	0,248	Cu	0,147	Pb	0,006
Mn	0,882	Co	0,008	As	0,027
P	0,011	B	0,001	Sb	0,018
S	0,022	Ti	0,001	Zn	0,001
Cr	1,031	V	0,003	Zr	0,002
Mo	0,170	W	0,005	Fe	96,868
Ni	0,069	Sn	0,010		
Nb	0,004	Te	0,004		



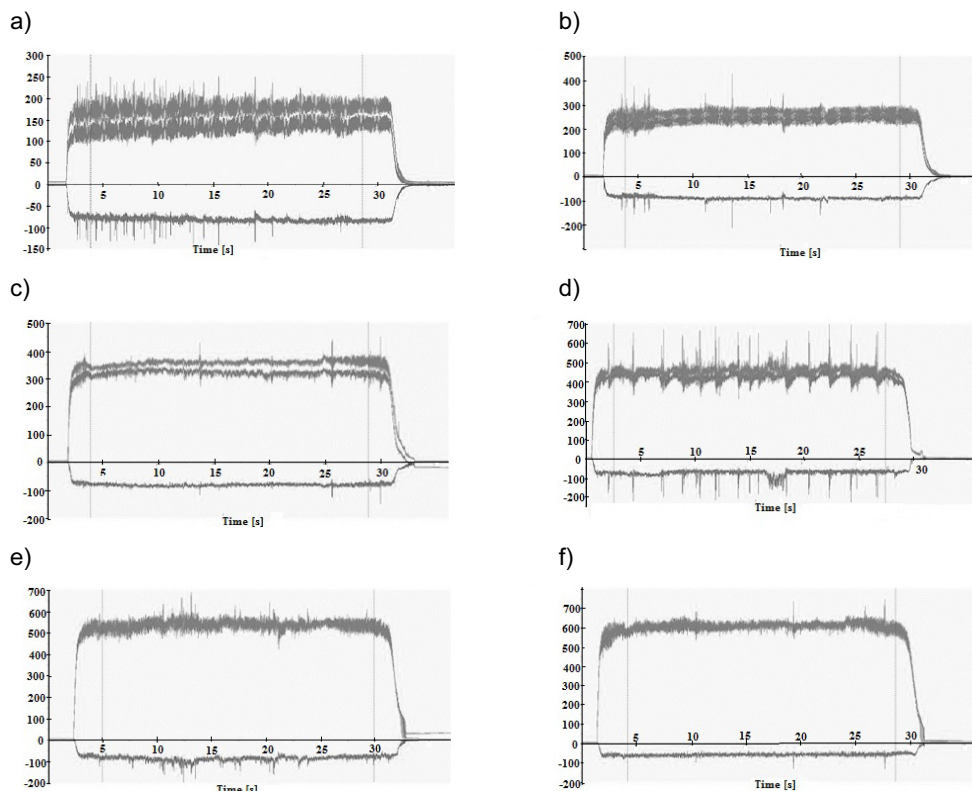
Rys. 8. Próbką użyta do badania składu chemicznego stali

Fig. 8. The sample used for testing the chemical composition of the steel

Podczas badań wstępnych wykonano toczenie wzdłużne czopów wałów z głębokością skrawania $a_p = 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,5$ oraz $1,75$ mm. Proces skrawania przeprowadzono na sucho. Na rysunku 9 przedstawiono wpływ zmiany głębokości skrawania na wartości analizowanych sił podczas toczenia. Na wykresach zobrazowano pełny przebieg procesu skrawania, dla którego całkowity czas obróbki pojedynczego czopa wynosił ok. 35 s. Natomiast w tabeli 2 zawarto wyniki średnich wartości pomiarów sił dla czasu skrawania równego 25 s.

Analiza obejmuje okres ciągłej obróbki materiału, która nie uwzględnia wejścia noża tokarskiego w materiał obrabiany oraz momentu wyjścia z powierzchni obrabianej wału. Najmniejszą średnią wartość siły skrawania (176,7 N) uzyskano podczas toczenia z głębokością skrawania równą 0,5 mm. Zwiększanie parametru a_p o kolejne 0,25 mm powoduje w miarę równomierny wzrost analizowanej siły F_c . Największą wartość tej siły (611,9 N) uzyskano dla maksymalnej głębokości skrawania równej 1,75 mm. Podobny wzrost średniej wartości można zaobserwować dla siły posuwowej. Wraz ze wzrostem głębokości

skrawania następuje wzrost siły F_t . Maksymalną wartość tej siły (605,1 N) uzyskano dla $a_p = 1,75$ mm. Natomiast zwiększenie głębokości skrawania nie spowodowało wyraźnych zmian wartości siły odporowej. Uzyskane średnie wartości siły F_p wahały się w zakresie od 59,2 do 89,4 N, a najmniejszą jej wartość uzyskano dla procesu toczenia z $a_p = 1,75$ mm. Przebiegi sił skrawania i posuwowej pozwalają zaobserwować zbliżone ich wartości dla głębokości skrawania powyżej 1,00 mm.



Rys. 9. Siły skrawania dla a_p [mm]: a) 0,50, b) 0,75, c) 1,00, d) 1,25, e) 1,50, f) 1,75

Fig. 9. Cutting forces for a_p [mm]: a) 0.50, b) 0.75, c) 1.00, d) 1.25, e) 1.50, f) 1.75

Na zarejestrowanych przebiegach pomiarowych sił podczas procesu toczenia widoczne są pojedyncze punkty, które znacznie odstają od linii pomiarowej. Największy rozrzut między minimalnymi a maksymalnymi siłami można zaobserwować dla głębokości skrawania równej 1,25 mm. Uzyskana średnia wartość odchylenia standardowego dla tej głębokości skrawania świadczy o najmniej stabilnym procesie skrawania.

Tabela 2. Średnie wartości sił skrawania podczas toczenia**Table 2.** The average values of cutting forces during turning

Siły skrawania [N]	Głębokość skrawania a_p [mm]					
	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75
F_c	176,70	267,60	356,40	461,50	539,30	611,90
Odchylenie standardowe	17,67	18,20	14,93	30,14	24,07	21,98
Błąd standardowy	0,04	0,04	0,03	0,06	0,05	0,04
F_f	131,20	234,30	320,70	425,00	529,50	605,10
Odchylenie standardowe	15,98	16,24	10,12	20,89	21,58	19,13
Błąd standardowy	0,03	0,03	0,02	0,04	0,04	0,04
F_p	81,60	89,40	81,50	75,40	87,00	59,20
Odchylenie standardowe	10,62	11,27	11,31	20,84	15,17	13,77
Błąd standardowy	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03

W tabeli 3 przedstawiono podstawową analizę statystyczną parametru chropowatości Ra . Najmniejszą wartość tego parametru uzyskano dla głębokości skrawania równej 0,5 mm. Stały wzrost głębokości skrawania o wartość 0,25 mm nie spowodował stałego zwiększenia średniej wartości parametru Ra . Największą wartość $Ra = 1,33 \mu\text{m}$, a tym samym powierzchnię o najgorszej chropowatości powierzchni uzyskano dla $a_p = 0,75 \text{ mm}$.

Tabela 3. Wyniki podstawowej analizy statystycznej parametru chropowatości Ra [μm]**Table 3.** Results of statistic analysis of surface roughness parameter Ra [μm]

Głębokość skrawania [mm]	Wartość średnia	Minimalna	Maksymalna	Odchylenie standardowe	Błąd standardowy
0,50	0,92	0,89	0,94	0,02	0,01
0,75	1,33	1,23	1,38	0,06	0,02
1,00	1,01	0,94	1,10	0,06	0,02
1,25	1,18	1,15	1,25	0,05	0,02
1,50	1,09	0,97	1,22	0,10	0,03
1,75	1,27	1,12	1,35	0,09	0,03

WNIOSKI

Wraz ze wzrostem głębokości skrawania następuje jednoczesny wzrost sił skrawania i posuwowej. Dla głębokości powyżej 1 mm siły te osiągają zbliżone wartości. Dla siły odporowej najmniejszą wartość uzyskano dla maksymalnej

głębokości skrawania. Natomiast pomiar parametru chropowatości powierzchni Ra wykazał, że przy zastosowanych parametrach skrawania najmniejszą wartość otrzymano dla $a_p = 0,5$ mm. Zwiększenie głębokości skrawania nie wpłynęło jednoznacznie na uzyskiwane wyniki parametru chropowatości. Największą wartość parametru $Ra = 1,33$ μm osiągnięto przy głębokości skrawania równej 0,75 mm.

W artykule przedstawiono wyniki badań wstępnych przeprowadzonych na wałkach ze stali konstrukcyjnej zwykłej jakości. Planowane są badania mające na celu określenie zbioru czynników wejściowych, stałych i zakłócających dla procesu toczenia wykończeniowego czopów wałów wykonanych ze stali nierdzewnej, mających wpływ na siły skrawania i strukturę geometryczną powierzchni. Obróbka skrawaniem stali odpornych na korozję, a w szczególności stali o strukturze austenitycznej, sprawia dużo trudności. Na skrawalność stali austenitycznych niekorzystny wpływ mają: wysoka skłonność do umacniania się przez zgniot, niska przewodność cieplna i dobra ciągliwość.

LITERATURA

1. Burakowski T., *Tribologia a inżynieria powierzchni*, Tribologia, 1999, nr 6.
2. Burakowski T., Marczak R., *Eksplatacyjna warstwa wierzchnia i jej badanie*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 1995, nr 3.
3. Burakowski T., Marczak R., Senatorski J., Szumniak J., *Konstituowanie eksploatacyjne warstwy wierzchniej w procesie tarcia technicznie suchego*, Problemy Eksploatacji, 1998, nr 2.
4. Dyl T., *Finishing intermetallic coatings in order to reduce the surface roughness*, Journal of KONES, 2013, vol. 20, no. 1.
5. Dyl T., *The finishing of composite coatings in aspect of surface roughness reduction*, Journal of KONES, 2013, vol. 20, no. 2.
6. Dyl T., Starosta R., *Określenie wpływu geometrii i rodzaju materiału płytek skrawających na topografię toczonych powłok kompozytowych*, Inżynieria Materiałowa, 2012, nr 6.
7. Dyl T., Starosta R., *Wpływ geometrii i gatunku płytek skrawających na strukturę geometryczną toczonych powłok stopowych*, Inżynieria Materiałowa, 2011, nr 4.
8. Labuda W., *The analysis of cutting tool geometric on cutting forces and surface roughness of steel applied to marine pumps shaft pins*, Journal of KONES, 2014, vol. 21, no. 1.
9. Labuda W., Charchalis A., *Ocena wpływu geometrii noża tokarskiego na strukturę geometryczną powierzchni czopów wałów wykonanych ze stali austenitycznej*, Logistyka, 2014, nr 6.
10. Nadolny K., Selech J., Tyczewski P., *Zmiany struktury geometrycznej powierzchni powstałe podczas testów zużyciowych*, Tribologia, 2003, nr 5.
11. Przybylski W., *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005.
12. Przybylski W., *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*, t. 2, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008.
13. Starosta R., Dyl T., *Obróbka wykańczająca natryskiwanych płomieniowo powłok Ni-Al, ocena zużycia borazonowych płytek skrawających*, Tribologia. Teoria i Praktyka, 2011, nr 4.

INFLUENCE OF CUTTING DEPTH CHANGES ON THE VALUE OF CUTTING FORCES AND SURFACE ROUGHNESS PARAMETER DURING SHAFT PINS TURNING

Summary

The paper presents the results of influence of changes in the depth of cut on the value of the cutting forces and surface roughness parameters of shaft pins. The turning process of shaft pins ϕ 50 mm in diameter, made of S235JR steel was carried out on a CU500MRD universal machine. The lathing process was conducted by a cutting tool with CCMT 09T304 PF removable inserts. The measurement of cutting forces during turning was recorded using a dynamometer made by Kistler. The measurement of surface roughness parameter was performed by W20 profilometer. For research also used the Baty Venture optical coordinate measuring machine and the Solaris optical emission spectrometer.

Keywords: cutting forces, surface roughness parameter, finish turning.