

Dr hab. inż. Anna ZAWADA-TOMKIEWICZ, prof. PK; mgr inż. Izabela WIERUCKA;
prof. dr hab. inż. Borys STORCH (Politechnika Koszalińska):

OGRANICZENIE WPLYWU CZYNNIKÓW ZAKŁÓCAJĄCYCH NA DOKŁADNOŚĆ WYKONANIA GWINTU

Streszczenie

Przedstawiono zagadnienia zapewnienia jakości w procesie wytwarzania gwintu, przy czym skoncentrowano się na etapie projektowania tolerancji. Kolejno omówiono główne czynniki zakłócające i sterowalne w procesie wytwarzania oraz kwestię sprawdzania dokładności wykonania gwintu w trakcie obróbki.

Słowa kluczowe: dokładność wymiarowo-kształtowa, zużycie ostrza, analiza MSA

REDUCTION OF THE IMPACT OF DISTURBANCE FACTORS ON THE ACCURACY OF THREAD CUTTING

Abstract

The issues of quality assurance in the process of thread cutting have been presented, with focus on the stage of tolerance design. Subsequently, the main disturbance and control factors in the manufacturing process and the issue of examination of thread cutting accuracy during the machining were discussed.

Keywords: dimensional and form accuracy, blade wear, MSA analysis

OGRANICZENIE WPLYWU CZYNNIKÓW ZAKŁÓCAJĄCYCH NA DOKŁADNOŚĆ WYKONANIA GWINTU

Anna ZAWADA-TOMKIEWICZ¹, Izabela WIERUCKA, Borys STORCH

1. WPROWADZENIE

Dokładność geometryczna gwintu uzyskiwana w procesie skrawaniem wykazuje silną zależność od doboru warunków skrawania oraz utrzymywania tych warunków podczas obróbki. Jest to niezmiernie trudne zadanie, szczególnie podczas obróbki szybkościowej lub dla materiałów trudno obrabialnych [1, 2, 9], skąd stosowana jest strategia zaproponowana przez Taguchiego, która umożliwia sterowanie jakością off-line już w procesie przygotowania produkcji [3]. Strategia polega na trzyetapowym zapewnieniu jakości.

Etap pierwszy nazywany jest projektowaniem systemu. W etapie tym opracowywana jest specyfikacja wyrobu oraz koncepcja procesu wytwarzania. Realizacja etapu tego zapewnia odpowiedź na pytanie, czy system wytwarzania został dostosowany do definiowanej jakości wyrobu.

W etapie drugim, nazywanym projektowaniem parametru, następuje optymalizacja parametrów systemu wytwarzania i systemu pomiarowego. Etap ten obejmuje testowanie próbnych nominalnych wartości i na podstawie testowania określenie najlepszych kombinacji poziomów parametrów oraz operatywnych poziomów wskaźników procesu, tak, aby były one najbardziej odporne na zmiany zachodzące w otoczeniu zewnętrznym i na inne czynniki zakłócające.

W etapie trzecim następuje ustalenie ścisłych tolerancji dla tych parametrów gwintu lub wskaźników procesu jego wytwarzania, których odchylenia od wartości nominalnych wywierają duży wpływ na zmienność końcową. Prezentowany artykuł skupia się na etapie trzecim, projektowaniu tolerancji. Zawiera kolejno ustalenie czynników zakłócających i sterowalnych w procesie wytwarzania oraz opracowaniu metody i sprawdzaniu dokładności wykonania gwintu w trakcie obróbki.

¹ Politechnika Koszalińska, 75-620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17,

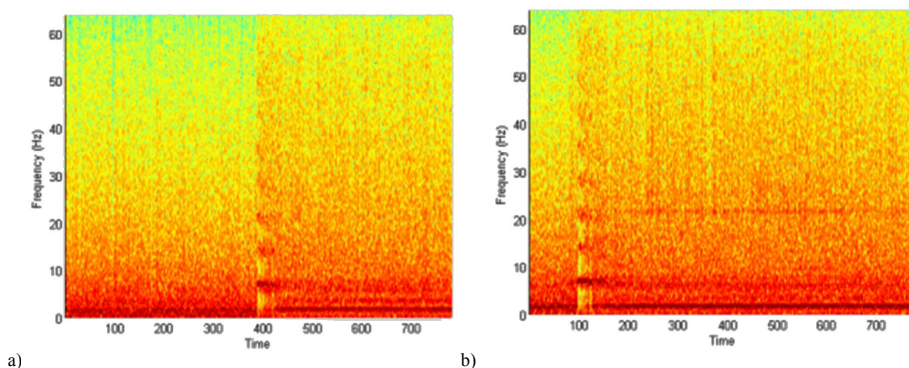
2. USTALENIE CZYNNIKÓW STEROWALNYCH I ZAKŁÓCAJĄCYCH

Czynnikami sterowalnymi w zakresie dokładności geometrycznej gwintu są te, które powodują odchyłki geometryczne systematyczne stałe lub systematyczne zmienne, które można zredukować podczas procesu obróbki. Odchyłki systematyczne stałe obejmują odchyłki spowodowane niedokładnością geometryczną lub kinematyczną obrabiarki, nieprawidłowym ustawieniem narzędzia lub niedokładnością geometryczną jego wykonania. Odchyłki systematyczne zmienne obejmują te odchyłki, które wynikają ze zjawisk zachodzących w trakcie obróbki w sposób regularny. Zalicza się do nich odchyłki na skutek zużycia narzędzia i odkształceń cieplnych obrabiarki.

Czynnikami zakłócającymi w zakresie dokładności geometrycznej gwintu są te, które są trudne do przewidzenia, a wynikają z wpływu zjawisk niepożądanych. Obejmują one odchyłki na skutek niejednorodnej twardości materiału obrabianego i jego struktury, niejednorodnych właściwości materiału narzędzia, zróżnicowanych naddatków na obróbkę, drgań układu i inne.

Rozpoznanie czynników sterowalnych i zakłócających w procesie wytwarzania gwintu, a następnie ich analiza umożliwi wyznaczenie relacji jakościowych. Bieżąca dokładność geometryczna gwintu zależy bowiem od oddziaływania czynników wymuszających, właściwości materiału obrabianego i narzędzia oraz innych czynników [13]. Trzy podstawowe zjawiska wpływające negatywnie na dokładność wykonania gwintu w obróbce skrawaniem to:

- pojawienie się odwracalnych procesów o różnej intensywności, np. niestabilność układu obróbkowego,
- skokowa zmiana jednego z parametrów geometrycznych gwintu poza granice uznane za dopuszczalne, np. na skutek uszkodzenia katastroficznego narzędzia,
- wskutek powolnych, nieodwracalnych procesów degradacyjnych (np. zużycia narzędzia).



Rys. 1. Spectrogramy sygnału drgań uzyskane na TNMG 160408 PF 4015, prędkość 200 m/min, przekroju warstwy skrawanej $0,15 \text{ mm}^2/\text{obr}$, a) ostrza w początkowej fazie zużycia, b) ostrza o $V/B = 0,22 \text{ mm}$

Analizę stabilności układu sprawdzono za pomocą czujnika sejsmicznego (częstotliwością próbkowania – 44100 Hz, rozdzielczością próbkowania – 16 bitów) dla pełnego zakresu prędkości obrotowych i przekroju warstwy skrawanej w zakresie od $0,05 \div 0,2 \text{ mm}^2/\text{obr}$. Stwierdzono, że w przypadku, gdy ostrze skrawające nie przekracza dopuszczalnej wartości zużycia, to układ zachowuje się stabilnie dla wszystkich badanych punktów pomiarowych. Na rysunku 1 zestawiono dwa spektrogramy sygnału drgań układu obróbkowego dla początkowego okresu skrawania w przypadku ostrza nowego oraz charakteryzującego się pewnym stopniem zużycia ($VB < VB_{dop}$). Pojawiające się drgania w układzie zostają szybko wytłumione, nie ma drgań samowzbudnych. Dodatkowym elementem sprawdzanym było bicie promieniowe przedmiotu obrobionego, które mieściło się w zakresie dopuszczalnym.

3. ZAPEWNIENIE DOKŁADNOŚCI WYKONANIA GWINTU W TRAKCIE OBRÓBK

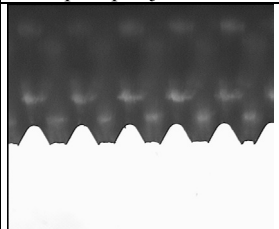
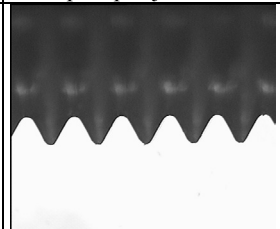
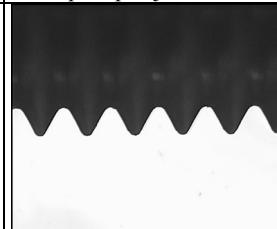
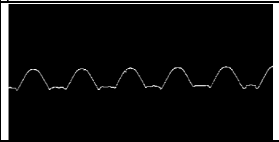

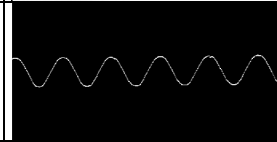
Do monitorowania i sprawdzenia dokładności wykonania gwintu w trakcie obróbki wykorzystuje się metody on-line, jak i off-line, dające bezpośredni pomiar geometrii gwintu, jak i metody pośrednie [4]. Jedną z metod oceny dokładności wykonania gwintu jest metoda optyczna, która polega na zastosowaniu systemu wizyjnego z automatyczną analizą obrazu do wyznaczenia charakterystyk pomiarowych gwintu. W [6] opisano sposób oceny jakości gwintu metodą optyczną z wykorzystaniem kamery cyfrowej. Wyniki porównano z pomiarem mikroskopem warsztatowym. Natomiast w [10] przedstawiono mikroskopowy system pomiarowy do oceny dokładności wymiarowo-w kształtowej gwintu, którego jakość porównywano z wynikami uzyskanymi dla współrzędnościowej maszyny pomiarowej oraz skanera laserowego. Metody przetwarzania obrazów do analizy zdjęć gwintu zestawione zostały w wielu pracach, choćby w [7] czy [10]. Najczęściej ocenie poddawane są wybrane parametry geometryczne gwintu takie jak podziałka, wysokość zarysu, kąt gwintu.

Zastosowany w badaniach zapewnienia dokładności wykonania gwintu w trakcie obróbki, system wizyjny (SW) został zbudowany w Politechnice Koszalińskiej jako modyfikacja systemu stacjonarnego – mikroskopowego systemu pomiarowego [10]. Założenia dla systemu wizyjnego, który zostaje włączony jako integralny element systemu wytwórczego zestawiono w [11]. Modyfikacja dla systemu wizyjnego do pomiaru gwintu polegała na włączaniu mikroskopowego systemu pomiarowego do układu obróbkowego i realizacji pomiarów w trakcie obróbki. Opracowany system wizyjny umożliwił pomiar po kolejnych dosuwach narzędzia. Rejestracji obrazu dokonano kamerą cyfrową IKEGAMI ICD-47E z przetwornikiem CCD $1/2''$ o rozdzielczości efektywnej $752 (H) \times 582 (V)$ pikseli, połączonej z komputerem. System wizyjny zastosowany w pomiarach umożliwił obserwację przedmiotu w świetle przechodzącym i odbitym.

Ocenę przydatności systemu wizyjnego podczas skrawania przeprowadzono dla gwintów zewnętrznych, mierząc śrubę $M8 \times 1$ z gwintem walcowym. Śruby wykonano ze stali 35SG poddanej procesowi ulepszenia cieplnego do twardości 30 HRC. Gwinty

zewnątrzne wykonano w tolerancji $6h$ [8]. Całkowity dosuw narzędzia podzielono na dziewięć dosuwów cząstkowych. Pomiarów dokonywano w 12 przekrojach w świetle przechodzącym i odbitym. W tablicy 1 zestawiono przykładowe zdjęcia wykonane dla oświetlenia w świetle przechodzącym oraz wynik komputerowego przetwarzania obrazu przy zastosowaniu filtra krawędziowego logarytmicznego.

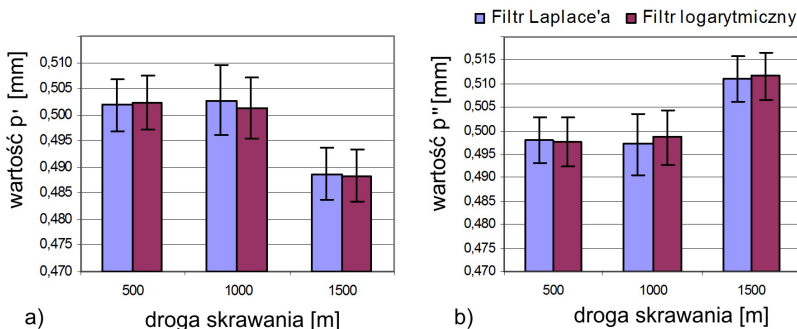
Tablica 1. Zestawienie zdjęć cyfrowych zarysu gwintu M8x1 w trakcie toczenia po trzech, sześciu i dziewięciu przejściach

	po 3 przejściach	po 6 przejściach	po 9 przejściach
Zdjęcie wykonane na obrabiarce w świetle przechodzącym			
Zarys krawędzi gwintu wykonany filtrem krawędziowym logarytmicznym			
Wynik pomiaru podziałki gwintu [mm]	0,997	0,997	1,001

4. OKREŚLENIE WPŁYWU ZUŻYCIA OSTRZA NA DOKŁADNOŚĆ WYKONANIA GWINTU

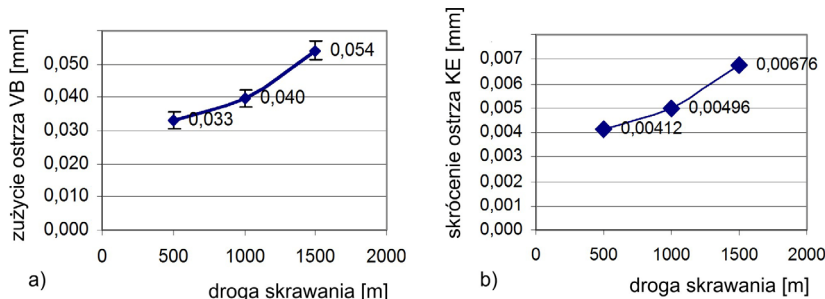
W przypadku kształtowania gwintu toczeniem, najbardziej znaczącym czynnikiem zakłócającym dokładność wymiarowo-kształtową jest zużycie ostrza. W celu analizy wpływu zużycia ostrza na kształt geometryczny gwintu zebrano dane z obrazu dotyczące zmian geometrii gwintu w trakcie procesu toczenia pod wpływem zużycia ostrza płytki skrawającej. Zmierzono wartości „połowy podziałki gwintu” dla bruzd p' i występów p'' na średnicy podziałowej. Dla celów analizy statystycznej wartości p' i p'' były wyznaczane wielokrotnie – 45 realizacji pomiarowych gwintu dla każdego z trzech punktów badań (dla drogi skrawania 500 m, 1000 m i 1500 m). Wykresy słupkowe na rysunku 2 prezentują zmianę geometrii gwintu, na występie oraz w bruzdzie gwintu, wyznaczoną z obrazu cyfrowego dla danej drogi skrawania.

Z analizy wykresów jasno wynika, że wydłużeniu drogi skrawania i skróceniu ostrza towarzyszy zmiana geometrii gwintu. Im dłuższa jest droga skrawania, tym bardziej gwint przestaje być symetryczny, występ staje się coraz większy, ponad zadaną tolerancję. Wyniki zmiany geometrii ostrza uzyskane z obrazu po filtracji obrazu filtrem krawędziowym logarytmicznym oraz Laplace'a były porównywalne.



Rys. 2. Zestawienie porównawcze uśrednionych wyników zmian geometrii gwintu a) połowa podziałki liczona dla bruzdy, b) połowa podziałki liczona dla występu gwintu

Najbardziej reprezentatywną i najczęściej przyjmowaną miarą zużycia ostrza jest szerokość starcia na powierzchni przyłożenia (głównej lub pomocniczej) – wartość VB . Pomiaru wartości VB dokonano w ten sposób, że każda z powierzchni przyłożenia (główna i pomocnicza) była poddana pięciokrotnej obserwacji. Wartość parametru VB zużycia ostrza została wyznaczona z obrazu cyfrowego, zgodnie z procedurą opisaną w [12]. System pomiaru wartości zużycia posiadał zdolność pomiaru zużycia z dokładnością $\pm 0,004$ mm.



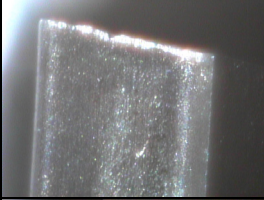
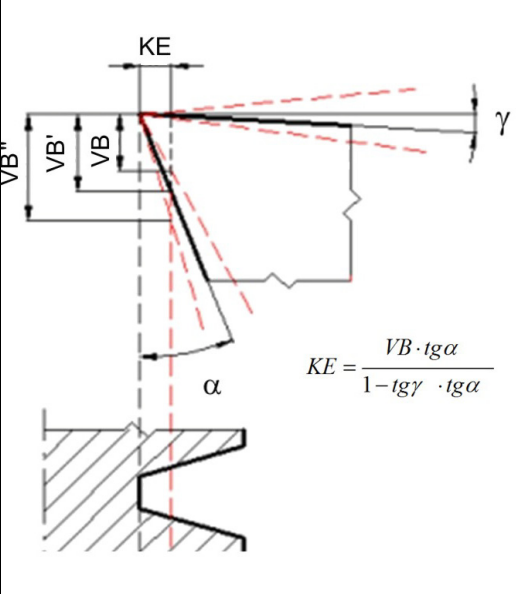
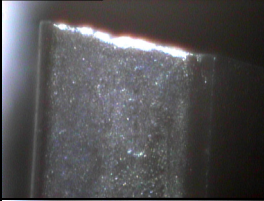
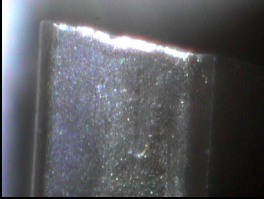
Rys. 3. a) Średnie zużycie ostrza płytki skrawającej na powierzchni przyłożenia, b) skrócenie ostrza

Na rysunku 3 przedstawiono wyznaczone z obrazu cyfrowego średnie zużycie VB ostrza płytki skrawającej na powierzchni przyłożenia dla drogi skrawania wynoszącej kolejno 500 m, 1000 m i 1500 m oraz zmianę skrócenia ostrza KE w funkcji drogi skrawania, wyznaczoną zgodnie z równaniem zestawionym w tabelicy 2.

W tabelicy 2 zestawiono przykładowe obrazy cyfrowe ostrza skrawającego od strony pomocniczej powierzchni przyłożenia dla trzech punktów badań. Uśrednione dla pomocniczej i głównej powierzchni przyłożenia wyniki pomiaru wskaźnika zużycia ostrza VB zostały zastosowane do wyznaczenia wskaźnika skrócenia ostrza KE , zgodnie

z równaniem zestawionym w tabelicy 2. Skrócenie ostrza KE modelowano w zależności od wielkości wytarcia i geometrii ostrza (kąta natarcia γ i kąta przyłożenia α).

Tablica 2. Zestawienie zdjęć cyfrowych ostrza skrawającego dla trzech wartości drogi skrawania

Droga skrawania l_s [m]		VB [mm]	 $KE = \frac{VB \cdot \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}$
500		0,033	
1000		0,040	
1500		0,054	
Droga skrawania [m]	VB [mm]		Skrócenie ostrza KE [mm]
l_s	0,00004 l_s		0,1248 VB

Pojawienie się zakłócenia w systemie, który zostało zidentyfikowane jako wpływające na błędy obróbki, uwzględnia się w układzie sterowania. Układ taki może dokonać korekty w trakcie obróbki lub po jej zakończeniu. Przykładowo, zużycie narzędzia i przemieszczenie wierzchołka ostrza może zostać wykorzystane do korekcji jego położenia. W ten sposób gwint będzie wykonany w tolerancji $6h$ mimo możliwości wystąpienia zakłócenia w postaci skrócenia ostrza.

W tabelicy 3 zestawiono wyniki analizy zdolności pomiarowej systemu wizyjnego zastosowanego do zapewnienia założonej dokładności pomiarowej gwintu $M8 \times 1$ przy uwzględnieniu procedury zawartej w poradniku MSA [5]. W przypadku oceny zdolności systemu pomiarowego do pomiaru danej wielkości w zadanej tolerancji wykorzystuje się dwa wskaźniki $\%GRR$ oraz ndc . Zarówno w przypadku zastosowania systemu wizyjnego ze światłem odbitym od powierzchni, jak i systemu wizyjnego ze światłem przechodzącym, gdzie obserwowany jest zarys gwintu, system wizyjny był zdolny do pomiaru podziałki gwintu na średnicy podziałowej i średnicy zewnętrznej.

Tablica. 3. Analiza oceny zdolności pomiarowej systemu wizyjnego dla d oraz d_2 , zgodnie z procedurą MSA, przy uwzględnieniu zmian na ostrzu podczas skrawania

Wielkość	Wzór obliczeniowy	Światło odbite	Światło przechodzące
Gwint $M8 \times 1$ 6h + korekta w programie obróbki			
EV [mm]	$EV = \bar{R} \cdot K_1, K_1 = 0,8862$	0,0047	0,0048
AV [mm]	$AV = \sqrt{\left(\bar{X}_{DIFF} \cdot K_2\right)^2 - \left(\frac{EV^2}{n \cdot r}\right)},$ $K_2 = 0,7071$	0	0
GRR [mm]	$GRR = \sqrt{EV^2 - AV^2}$	0,007	0,006
dla $ls = 1000$ m, $KE = 0.0049$ mm			
$d: e_i = -180 \mu\text{m} + KE(ls), e_s = 0$			
TV [mm]	$TV = (UCL - LSL + KE(ls)) / 6$	0,0291	0,0291
PV [mm]	$PV = \sqrt{TV^2 - GRR^2}$	0,0288	0,0289
% EV [%]	% $EV = 100(EV / TV)$	16,12	13,25
% AV [%]	% $AV = 100(AV / TV)$	0	0
% GRR [%]	% $GRR = 100(GRR / TV)$	16,12	13,25
% PV [%]	% $PV = 100(PV / TV)$	98,69	99,11
ndc []	$ndc = 1.41(PV / GRR)$	8,63	10,54
$d_2: e_i = -112 + KE(ls), e_s = 0$			
TV [mm]	$TV = (UCL - LSL + KE(ls)) / 6$	0,01785	0,01785
PV [mm]	$PV = \sqrt{TV^2 - GRR^2}$	0,0172	0,0174
% EV [%]	% $EV = 100(EV / TV)$	26,36	21,67
% AV [%]	% $AV = 100(AV / TV)$	0	0
% GRR [%]	% $GRR = 100(GRR / TV)$	26,36	21,67
% PV [%]	% $PV = 100(PV / TV)$	96,43	97,62
ndc []	$ndc = 1.41(PV / GRR)$	5,15	6,34

dla EV – powtarzalność, \bar{R} – rozstęp, AV – odtwarzalność, \bar{X}_{DIFF} – średnia różnic, n – liczba części, r – liczba prób, GRR – wskaźnik powtarzalności i odtwarzalności, PV – zmienność w obrębie części, TV – zmienność całkowita, ndc – liczba kategorii danych

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W podsumowaniu uznano, że proponowana metodyka spełnia założone oczekiwania w zakresie sprawdzenia dokładności wykonania gwintu w trakcie obróbki. Wyznaczony wskaźnik % GRR odnosi się do powtarzalności i odtwarzalności systemu pomiarowego

przy uwzględnieniu tolerancji mierzonej części i całkowitej zmienności systemu pomiarowego. W przypadku, gdy wartość %GRR jest większa niż 10% i mniejsza niż 30%, to ocenę należy uznać za zadowalającą, natomiast należy przeprowadzać okresową weryfikację zdolności pomiarowej tego systemu. Wskaźniki pozwalają też uznać, że układ nie jest przewymiarowany.

Wartość drugiego wskaźnika *ndc* zarówno w ocenie podziałki gwintu na średnicy podziałowej, jak i na zewnętrznej nie spada poniżej wartości dopuszczalnej 5. Jednak należy zwrócić uwagę, że wartość *ndc*, reprezentująca według procedury MSA liczbę kategorii danych, jest bliska tej wartości dla systemu wizyjnego z wykorzystaniem światła odbitego. Oznacza to, że w przypadku wymaganej większej dokładności pomiarowej należy stosować do obserwacji zarysu gwintu oświetlenie w postaci światła przechodzącego.

LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S. *Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
- [2] HUMIENNY Z. (RED.) I IN., *Specyfikacje Geometrii Wytworów* (GPS). Podręcznik europejski, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2004.
- [3] Krishankant J.T., Mohit B., Rajesh K. Application of Taguchi Method for Optimizing Turning Process by the effects of Machining Parameters International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) 2/1 (2012) 263-274.
- [4] MALINOWSKI J., JAKUBIEC W., PŁOWUCHA W.: *Pomiary gwintów w budowie maszyn*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2008.
- [5] *Measurement System Analysis MSA*. 4th Edition. Reference Manual 2010.
- [6] MUTAMBI J., YU L., *Application of Digital Image Analysis Method in Metric Screw Thread Metrology*, Journal of Shanghai University (English Edition) 2 (2004) 208 – 212.
- [7] PENG E., ZHANG G., *Image Processing Technology Research of On-Line Thread Processing*, Energy Procedia 17 (2012) 1408 – 1415.
- [8] PN-ISO 965-1:2001 *Gwinty metryczne ISO ogólnego przeznaczenia. Tolerancje. Część 1: Zasady i dane podstawowe*.
- [9] PONIATOWSKA M., *Pomiary współrzędnościowe i analiza odchylek geometrycznych powierzchni swobodnych*. Rozprawy naukowe Nr 266. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej. Białystok 2012.
- [10] WIERUCKA I., ZAWADA-TOMKIEWICZ A., ŁUKIANOWICZ CZ. *Ocena przydatności wybranych optycznych systemów pomiarowych w procesie wytwarzania i eksploatacji części maszyn* Mechanik 7/2013 538-543.
- [11] ZAWADA TOMKIEWICZ A., TOMKIEWICZ D. *Mechatronic monitoring tool (MMT) for machined surface evaluation during the cutting process* – (ID 269) ISMQC 2013, 11th International Symposium on Measurement and Quality Control, 11-13 września 2013, Kraków.
- [12] ZAWADA-TOMKIEWICZ A., *Measurement Uncertainty Assessment In Machine Vision System For Tool Wear Estimation*. Coordinate Measuring Technique (2008) 175-183.
- [13] ZAWADA-TOMKIEWICZ A., *Teoretyczne i doświadczalne podstawy monitorowania procesu toczenia z wykorzystaniem informacji o cechach stereometrycznych obrobionej powierzchni*. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012.