

BADANIA PORÓWNAWCZE DOKŁADNOŚCI PRZEDMIOTÓW ZE STALI 15-5PH ORAZ 4330 WYKONANYCH FREZOWANIEM

Comparison of the accuracy of 15-5PH and 4330 steel parts produced by milling

Józef KUCZMASZEWSKI, Kazimierz ZALESKI, Jakub MATUSZAK, Tomasz PAŁKA, Janusz MĄDRY

S t r e s z c z e n i e: Na dokładność elementów maszyn wpływa wiele czynników zależnych od: maszyn technologicznych, narzędzi, uchwytów obróbkowych, właściwości materiałów obrabianych, parametrów technologicznych, cieczy obróbkowych itp. W pracy przedstawiono wyniki badań dokładności partii przedmiotów o złożonym kształcie. Proces frezowania realizowano na 3-osiowym centrum obróbkowym Avia VMC-800HS. Pomiary dokładności geometrycznej przeprowadzono na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Vista ZEISS. Analiza powtarzalności błędów wymiarów wykonanych przez frezowanie przedmiotów umożliwiła określenie wartości tolerancji możliwej do uzyskania w warunkach produkcyjnych. Szczególną uwagę zwrócono na błędy wykonania ważne ze względów montażowych. Porównano dokładność przedmiotów wykonanych ze stali 15-5PH oraz 4330. Określono klasę dokładności wykonania, podano odchyłki oraz wykazano, że możliwe jest zachowanie porównywalnej dokładności wykonania elementów z dwóch materiałów, różniących się właściwościami przy doborze odpowiednich parametrów technologicznych obróbki.

S ł o w a k l u c z o w e: frezowanie, dokładność, tolerancja

A b s t r a c t: The accuracy of machine parts depend on numerous factors connected with: technological machines, tools, fixture clamps, the properties of workpiece material, cutting parameters, cutting fluids etc. This paper reports the results of a study investigating the accuracy of a series of objects with complex shape. The milling process was performed on a 3-axis machining center, Avia VMC-800HS. The measurements of geometric accuracy were made using the ZEISS Vista coordinate measuring machine. The examination of the repeatability of dimensional errors of the objects produced by milling led to determination of the values of tolerance which can be obtained under production conditions. Particular attention was paid to the errors of part quality as they may affect the assembly process. The accuracy of parts made of 15-5PH and 4330 steel was the compared. Accuracy class and dimensional deviation were determined. The results demonstrate that it is possible to ensure comparable accuracy of parts made of two different materials by selecting appropriate machining parameters.

K e y w o r d s: milling, accuracy, tolerance

Wprowadzenie

Dokładność elementów maszyn wpływa na prawidłowość działania maszyn i urządzeń zmontowanych z tych elementów oraz na przebieg montażu. Precyzyjność wykonania montowanych części ma decydujący wpływ na możliwości zastosowania montażu automatycznego [6]. Duża różnorodność połączeń montażowych [9] związana jest ze zróżnicowanym kształtem łączonych elementów. Złożoność kształtu montowanych części często jest przyczyną występowania licznych problemów w procesie ich obróbki, a także utrudnia zachowanie wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej.

Na dokładność elementów maszyn wpływa wiele czynników zależnych od: maszyn technologicznych, narzędzi, uchwytów obróbkowych, właściwości materiałów obrabianych, parametrów technologicznych, cieczy obróbkowych [1, 10]. Na wartość wymiarów i kształt obrabianych przedmiotów wpływają nie tylko cechy konstrukcyjne maszyny technologicznej, ale również jej stan techniczny, który może być oceniony na podstawie pracy tej maszyny [7]. Dokładność zależy też od kształtu obrabianych elementów, a szczególne trudności powstają podczas obróbki elementów cienkościennych z powodu większej podatności tych elementów na odkształcenia pod wpływem sił skrawania.

Zmniejszenie błędów obróbkowych można uzyskać przez odpowiedni dobór sztywnego narzędzia (jeśli pozwala na to kształt obrabianego przedmiotu), optymalizację parametrów technologicznych oraz zastosowanie odpowiedniej strategii obróbki [2, 4, 12]. W przypadku obróbki rowków i tzw. „kieszeni” o dużej głębokości, konieczne jest użycie frezów o odpowiedniej długości. Stosunek długości frezu do jego średnicy, z czym związana jest jego sztywność, w znacznym stopniu wpływa na dokładność geometryczną i chropowatość powierzchni obrabianych przedmiotów [5, 8].

Do czynników wpływających na błędy wymiarów wytwarzanych przedmiotów zalicza się również ciepło wydzielające się w procesie skrawania, które powoduje wzrost temperatury narzędzia i przedmiotu obrabianego. Zmiany wymiarów narzędzia i przedmiotu wskutek rozszerzalności cieplnej wpływają na wartość błędów obróbkowych [11].

Dokładność obróbki zależy również od właściwości materiału obrabianego. Na ogół trudniej uzyskać wymaganą dokładność w przypadku obróbki materiałów trudnoskrawalnych. Do takich materiałów należy zaliczyć utwardzoną wydzieleniowo stal nierdzewną 15-5PH, stosowaną w przemyśle lotniczym i jądrowym [3].

Celem pracy jest ocena powtarzalności błędów wymiarów przedmiotów ze stali 15-5PH oraz 4330

Tabela 1. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne badanych materiałów
Table 1. Chemical composition and mechanical properties of the tested materials

Stal 4330											
Skład chemiczny [%]											
C	Si	Mn	S	P	Cr	V	Ni	Mo	Cu	Fe	
0,32	0,30	0,91	0,001	0,006	0,84	0,08	1,85	0,47	0,07	reszta	
Właściwości mechaniczne											
Rm [MPa]		Rp _{0,2} [MPa]		A [%]		Z [%]		twardość [HRC]			
1613		1385		13		53		47			
Stal 15-5PH											
Skład chemiczny [%]											
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cb	Cu		
0,48	0,37	0,64	0,001	0,18	14,27	5,03	0,19	0,31	3,46		
Właściwości mechaniczne											
Rm [MPa]		Rp _{0,2} [MPa]		A [%]		Z [%]		twardość [HRC]			
1323		1172		17		44		42			

wykonanych frezowaniem, w aspekcie określenia wartości tolerancji możliwej do uzyskania w danych warunkach produkcyjnych.

Metodyka badań

Do badań użyto próbek wykonanych ze stali 15-5PH oraz 4330. Skład chemiczny i właściwości fizyczne badanych stali przedstawiono w tab. 1. Stal 15-5PH ze względu na swoje właściwości należy do grupy materiałów trudnoobrabialnych.

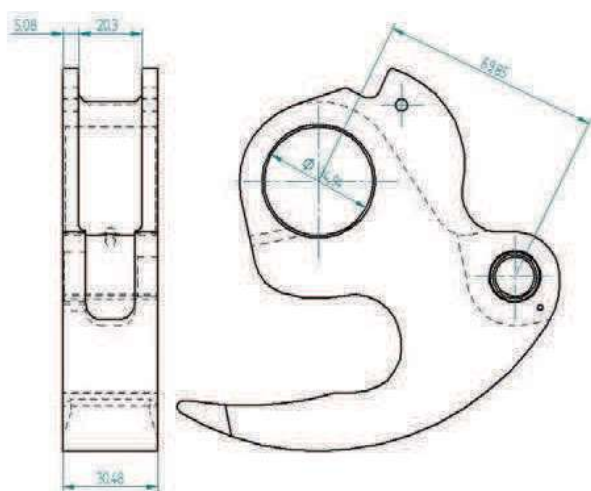
Proces frezowania przeprowadzono na trzyosiowym centrum obróbkowym Avia VMC-800HS, wyposażonym w sterowanie Heidenhain. Maszyna ma wrzeczono o mocy 25 kW i maksymalnej prędkości obrotowej 24 tys. obr./min, dzięki czemu dedykowana jest do realizacji procesów obróbki HSM.

Proces frezowania polegał na wykonaniu serii elementów o złożonym kształcie, a następnie przeprowadzeniu pomiarów charakterystycznych wymiarów na współrzędnościowej maszynie Vista ZEISS. Model CAD wraz z charakterystycznymi wymiarami pokazano na rys. 1. Element typu dźwignia został wykonany w ilości czterech sztuk z dwóch badanych materiałów. Do wykonania elementu na trzyosiowym centrum niezbędna była obróbka w czterech zamocowaniach. Wykorzystano frezy palcowe pełnowęglkowe o średnicach $D = 12$ i $D = 6$ mm oraz frez kulisty do obróbki profilowej o średnicy $D = 6$ mm. Czas obróbki (wg programów CAM) elementu wykonanego ze stali 15-5PH wyniósł $t = 217$ min, w tym ruchy jałowe 11,13 min, a ruchy ustawcze 0,72 min. Całkowita długość ścieżki narzędzia wyniosła 63435 mm. W przypadku obróbki stali 4330, z uwagi na zastosowanie takiej samej strategii obróbki czasy jałowe i ustawcze oraz ścieżka narzędzia były takie same, natomiast lepsza skrawalność pozwoliła na zastosowanie wyższych parametrów i skrócenie czasu obróbki do $t = 166$ min.

Niektóre spośród mierzonych wymiarów, w aspekcie współpracy elementu w złożeniu są szczególnie istotne. Wymiary te zaznaczono na rys. 1 oraz zestawiono w tab. 2.

Tabela 2. Wymiary istotne z uwagi na montaż
Table 2. Important assembly dimensions

Wymiar nominalny (mm)	69,85	34,935	30,48	20,3	5,08
Identyfikacja	rozstaw otworów	średnica otworu	wysokość elementu	rozstaw kołnierzy	grubość kołnierza



Rys. 1. Obrabiany element typu dźwignia
Fig. 1. Workpiece type lever

Wyniki badań

Na rys. 2 przedstawiono przykładowy element typu dźwignia po obróbce frezowaniem.



Rys. 2. Element typu dźwignia po obróbce frezowaniem
Fig. 2. The lever element after milling

W tab. 3 i 4 przedstawiono wyniki pomiarów dokładności geometrycznej serii czterech elementów wykonanych ze stali 15-5PH (tab. 3) i 4330 (tab. 4). Określono wymiar maksymalny i minimalny z serii. Ponadto obliczono wielkości pozwalające wyznaczyć tolerancje i odchyłki.

Na podstawie wyników zawartych w tab. 3 i 4 określono klasę dokładności i odchyłki. W tab. 5 przedstawiono w jakiej klasie dokładności zostały wykonane poszczególne składowe elementy typu dźwignia. Ponadto podano odchyłkę w postaci symbolu literowego dla wymiarów zewnętrznych i wewnętrznych oraz odchyłkę liczbową dla rozstawu otworów.

Dla obydwu serii elementów wykonanych ze stali 15-5PH oraz 4330, maksymalną odchyłkę odnotowano w przypadku pomiaru grubości kołnierza. Dla serii 4 elementów wykonanych ze stali 15-5PH uzyskano klasę dokładności IT13, natomiast dla stali 4330 klasa dokładności wyniosła IT11. Może to być spowodowane niewystarczającą powtarzalnością zamocowania przedmiotu obrabianego. Wykonywana część, ze względu na skomplikowaną geometrię, wymusza wielokrotne mocowanie do kolejnych zabiegów technologicznych. Powoduje to powielanie błędów mocowania i błędów pomiarów położenia miejsca zerowego przy pomocy sondy przedmiotowej.

Tabela 3. Wyniki badań dokładności geometrycznej demonstratorów wykonanych ze stali 15-5PH
Table 3. Results of geometric accuracy of elements made of 15-5PH steel

Wymiar nominalny N [mm]	wartość zmierzona, mm				analiza z serii elementów				
	dźwignia nr 1	dźwignia nr 2	dźwignia nr 3	dźwignia nr 4	wymiar maksymalny B	wymiar minimalny A	różnica B – A	różnica B – N	różnica A – N
69,85	69,844	69,858	69,850	69,818	69,858	69,818	0,040	0,008	-0,032
34,935	34,910	34,925	34,893	34,9	34,925	34,893	0,032	-0,010	-0,042
30,48	30,507	30,559	30,493	30,503	30,559	30,493	0,066	0,079	0,013
5,08	5,164	5,176	5,342	5,293	5,342	5,164	0,178	0,262	0,084
20,3	20,300	20,305	20,300	20,309	20,309	20,300	0,009	0,009	0

Tabela 4. Wyniki badań dokładności geometrycznej demonstratorów wykonanych ze stali 4330
Table 4. Results of geometric accuracy of elements made of 4330 steel

Wymiar nominalny N [mm]	wartość zmierzona, mm				analiza z serii elementów				
	dźwignia nr 1	dźwignia nr 2	dźwignia nr 3	dźwignia nr 4	wymiar maksymalny B	wymiar minimalny A	różnica B – A	różnica B – N	różnica A – N
69,85	69,851	69,856	69,842	69,827	69,856	69,827	0,029	0,006	-0,023
34,935	34,936	34,936	34,906	34,888	34,936	34,888	0,048	0,001	-0,047
30,48	30,509	30,509	30,559	30,457	30,559	30,457	0,102	0,079	-0,023
5,08	5,280	5,281	5,207	5,280	5,281	5,207	0,074	0,201	0,127
20,3	20,311	20,311	20,264	20,291	20,311	20,264	0,047	0,011	-0,036

Tabela 5. Odchyłki i klasy dokładności wykonania poszczególnych składowych elementu typu dźwignia
Table 5. Deviations and accuracy classes of individual components of the lever type element

Wymiar nominalny N [mm]	Identyfikacja	stal 15-5-PH		stal 4330	
		klasa dokładności	odchyłka	klasa dokładności	odchyłka
69,85	rozstaw otworów	IT8	69,85 ^{+0,008} _{-0,032}	IT7	69,85 ^{+0,006} _{-0,023}
34,935	średnica otworu	IT8	M8	IT9	Js11
30,48	wysokość elementu	IT10	k10	IT11	js11
5,08	grubość kołnierza	IT13	> zc11	IT11	> zc11
20,3	rozstaw kołnierzy	IT5	H6	IT9	Js10

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej obróbki serii elementów typu dźwignia, wykonanych ze stali 15-5PH i 4330, można stwierdzić, że:

- z uwagi na trudnoobrabialność stali 15-5-PH czas wykonania elementu typu dźwignia jest o 51 min dłuższy, co stanowi wzrost o 30,7% w stosunku do elementu wykonanego ze stali 4330,
- niższe parametry obróbki stali trudnoobrabialnej 15-5PH pozwoliły na zachowanie porównywalnej dokładności wykonania elementów w stosunku do stali 4330,
- dla poprawy dokładności wykonania kołnierza (wymiar nominalny 5,08 mm), należałoby dokonać korekty procesu technologicznego i przeprowadzić obróbkę obu stron kołnierza w jednym zamocowaniu.
- dla przedmiotów o skomplikowanej geometrii zaleca się stosowanie przyrządów obróbkowych w celu zachowania powtarzalności wartości wymiarów lub zmniejszenie ilości mocowań, wprowadzenie kontroli międzyoperacyjnej lub zachowanie naddatku dla późniejszego niwelowania błędów.

LITERATURA

- [1] Barylski A., O. Szabo. 1996. „Technologiczne problemy dokładnej i ultraprecyzyjnej obróbki wiórowej i ściernej. Część II”. *Przegląd Mechaniczny* (7): 26–27.
- [2] Burek J. i in. 2014. „Wpływ strategii obróbki na dokładność kształtową przy pięcioosiowym frezowaniu elementów cienkościennych frezom kulistym”. *Mechanik* (8–9): 273–280/733.
- [3] Chomienne V. et. al. 2016. „Influence of part's stiffness on surface integrity induced by a finish turning operation of 15-5PH stainless steel”. *Procedia CIRP* (45): 19–22.
- [4] Kuczmaszewski J., P. Pieško. 2016. „Analiza wpływu prędkości skrawania na odkształcenia po frezowaniu elementów cienkościennych wykonanych ze stopu EN AW-2024”. *Mechanik* (8–9).
- [5] Kuczmaszewski J., K. Zaleski. 2015. „Obróbka skrawaniem stopów aluminium i magnezu”. Politechnika Lubelska.
- [6] Łunarski J., W. Szabajkovicz. 1993. „Automatyzacja procesów technologicznych montażu maszyn”. Warszawa: WNT.

- [7] Miko E., A. Przybytniewski. 2015. „Badania dokładności pracą tokarki CTX Alpha 500”. *Mechanik* (8–9): 460–468/727.
- [8] Pieško P., I. Zagórski. 2011. „Analiza dokładności obróbki, frezami trzpieniowymi o zmiennej sztywności, tulei cienkościennych wykonanych ze stopu AlMn1”. [W:] Świć A. (red.) „Innowacyjne procesy technologiczne”. Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe.
- [9] Puff T., W. Sołtys. 1980. „Podstawy technologii montażu maszyn i urządzeń”. Warszawa: WNT.
- [10] Skoczyński W. 2002. „Analiza błędów przedmiotu obrabianego spowodowanych czynnikami wynikającymi z własności obrabiarek i procesu skrawania”. *Przegląd Mechaniczny* (11): 13–19.
- [11] Zaleski K., J. Matuszak. 2011. „Odkształcenia cieplne przedmiotów ze stopu aluminium w toczeniu”. [W:] Grzesik W. (red.) „Obróbka skrawaniem. Nauka a przemysł”. Politechnika Opolska.
- [12] Zębala W. 2010. „Minimalizacja błędów obróbki przedmiotów cienkościennych”. *Inżynieria Maszyn* (3): 45–54.

Badania realizowane w ramach projektu sektorowego INNOLOT (Akronim AMpHOra) pt. „Badania technologii przyrostowych procesów hybrydyzacji obróbki dla potrzeb rozwoju innowacyjnej produkcji lotniczej”, koordynowanego przez Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o. – PZL Mielec, współfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w zakresie Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

Priorytet I., Działanie 1.5 PO IG., nr umowy INNOLOT //6/NCBR/2013

prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: j.kuczmaszewski@pollub.pl

dr hab. inż. Kazimierz Zaleski, prof. PL – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: k.zaleski@pollub.pl

dr inż. Jakub Matuszak – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: j.matuszak@pollub.pl

mgr inż. Tomasz Pałka – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: t.palka@pollub.pl

mgr inż. Janusz Mądry – Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o. – PZL Mielec, ul. Wojska Polskiego 3, 39-300 Mielec