

OCENA DOKŁADNOŚCI WYKONANIA ELEMENTÓW OBRABIANYCH MIKRONARZĘDZIAMI

Józef KUCZMASZEWSKI, Paweł PIEŚKO,
Magdalena ZAWADA-MICHAŁOWSKA

Streszczenie: W pracy przedstawiono ocenę dokładności wykonania elementów obrabianych mikronarzędziami na przykładzie zaprojektowanego i wykonanego w dwóch wersjach mechanicznego połączenia zatrzaskowego z walcową częścią mocującą. Jako wskaźnik określający dokładność wykonania przyjęto błąd wykonania, który zdefiniowano jako różnicę pomiędzy wartością wymiaru nominalnego a otrzymaną wartością zmierzoną. Na podstawie przeprowadzonych badań zauważono wyraźny wzrost błędu wykonania wraz ze wzrostem wartości wymiaru nominalnego. Analizowano również warunki wykonania zatrzasku oraz technologiczność konstrukcji.

Słowa kluczowe: dokładność wykonania, mikronarzędzia, proces frezowania, połączenia zatrzaskowe

1. Wprowadzenie

Jednym z najczęściej stosowanych sposobów wytwarzania elementów maszyn jest obróbka skrawaniem, pozwalająca na uzyskanie odpowiedniej dokładności wymiarowo-kształtowej oraz wysokiej jakości powierzchni. Nowoczesna obróbka skrawaniem jest także wystarczająco efektywna w aspekcie ekonomicznym, maszyny technologiczne są niezawodne, zapewniają odpowiednią powtarzalność cech jakościowych kształtowanych elementów [1].

Dokładność wykonania elementu definiowana jest jako „stopień zgodności z częścią idealną” [2]. Ze względu na brak nieskończonej doskonałości metod wytwarzania oraz maszyn technologicznych, niemożliwe jest uzyskanie pełnej zgodności. W budowie maszyn odstępstwa cech elementów rzeczywistych od idealnych opisywane są za pomocą odchyłek, wśród których wymienia się błędy m.in.: wymiarów, kształtu oraz położenia, wpływające w dużym stopniu na prawidłowe funkcjonowanie maszyn oraz jakość montażu. Prowadzi to między innymi do rozrzutu w wartościach pasowania węzłów kinematycznych maszyn, a w konsekwencji do nierównomiernego rozkładu naprężenia, generującego szybsze zużywanie się części i zmniejszanie dokładności współpracy poszczególnych elementów maszyn. Dokładność wykonania elementów przy zastosowaniu obróbki skrawaniem zależy od wielu czynników związanych zarówno z samym procesem skrawania, jak i historią technologiczną stosowanego półfabrykatu [1-3, 5].

Głównymi źródłami powstawania błędów są m.in. [1-3]:

- niedokładność maszyny technologicznej, która zwiększa się w miarę upływu czasu;
- niedokładność narzędzia skrawającego, będąca konsekwencją niedokładności wykonania danego narzędzia oraz jego zużycia podczas eksploatacji;
- niedostateczna sztywność układu OUPN;
- nagrzewanie się układu OUPN, prowadzące do jego odkształceń cieplnych;

- występowanie drgań;
- relaksacja naprężeń własnych półfabrykatu.

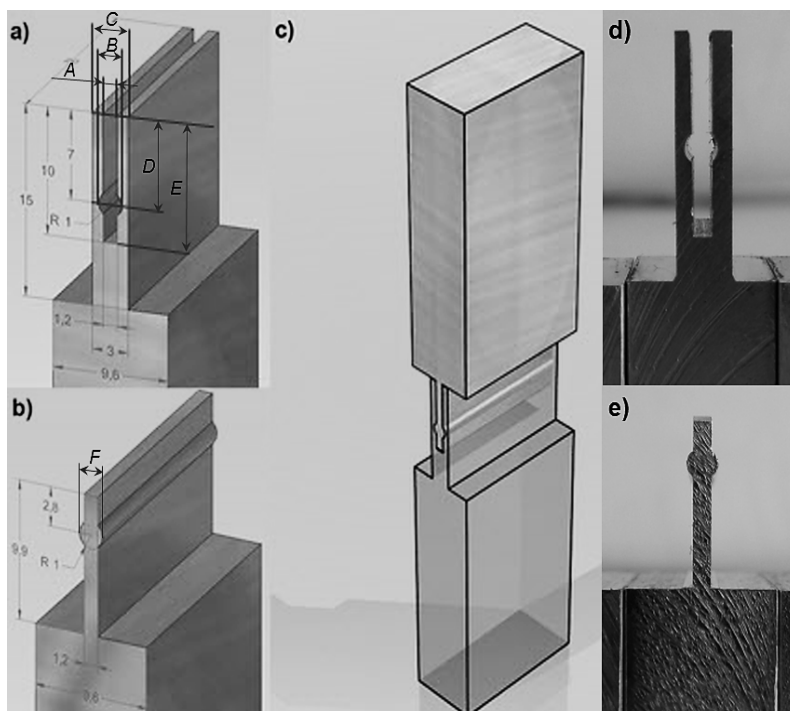
Charakterystyczną cechą frezowania jest przerywana praca ostrzy, zapewniająca dobre warunki chłodzenia, ale powodująca zmienne obciążanie, wpływające negatywnie m.in.: na stabilność dynamiki układu OUPN, jakość powierzchni obrobionych oraz trwałość narzędzi [1].

Obecnie do wytwarzania wyrobów miniaturowych (o wymiarach od 300 μm do kilku mm) oraz mikrowyrobów (poniżej 300 μm) stosowana jest mikroobróbka. Jedną z jej odmian jest frezowanie mikronarzędziami, pozwalające na otrzymanie złożonych kształtów oraz precyzyjnych wymiarów, niemożliwych do uzyskania innymi metodami [4,6].

Celem pracy jest ocena dokładności wykonania dwóch elementów mechanicznego połączenia zatrzaskowego po frezowaniu mikronarzędziami.

2. Analiza cech geometrycznych badanych elementów

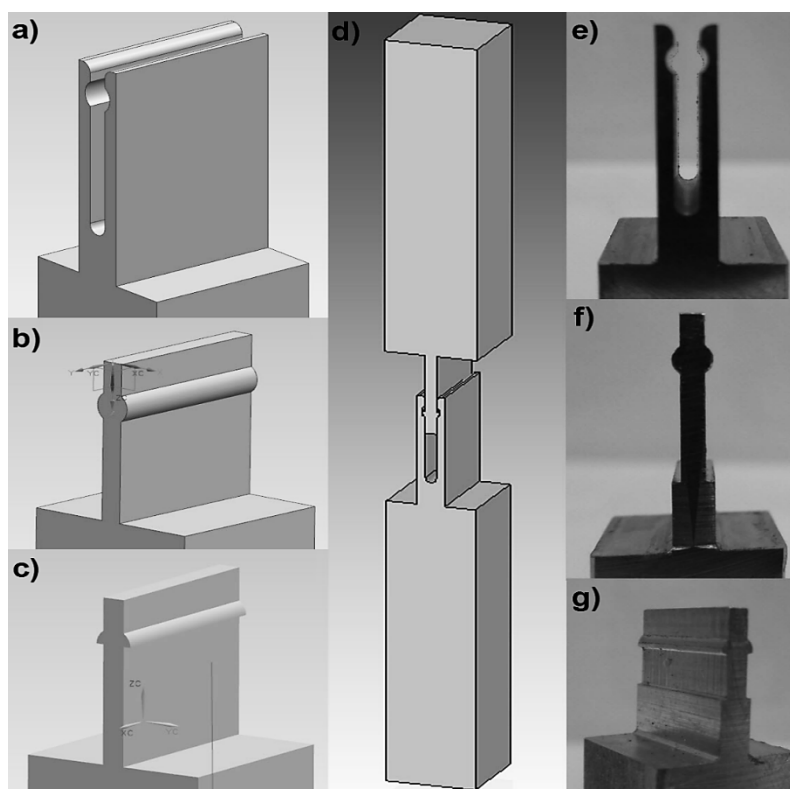
W ramach pracy zaprojektowano i wykonano połączenie zatrzaskowe z walcową częścią mocującą w dwóch wersjach. Na rys. 1 przedstawiono pierwszy wariant połączenia, składający się z dwóch elementów, części „obejmującej” (rys. 1 a, d) i „obejmowanej” (rys. 1 b, e).



Rys. 1. Pierwsza wersja połączenia zatrzaskowego: a) model części „obejmującej”, b) model części „obejmowanej”, c) model złożenia, d) widok wykonanej części „obejmującej”, e) widok wykonanej części „obejmowanej”

Geometrię połączenia zweryfikowano z zastosowaniem analizy MES pod kątem rozkładu

naprężeń, co przełożyło się na zaprojektowanie i wykonanie nowej geometrii połączenia, którą przedstawiono na rys. 2. Szczególnie ważne jest położenie gniazda zatrzasku w części „obejmującej”, a więc różnica wymiarów E-D. Zbyt mała różnica powoduje przekroczenie granicy plastyczności materiału przy montażu, co jest niedopuszczalne z punktu widzenia istoty funkcjonowania zatrzasku, połączenie musi być kształtowane w warunkach odkształcenia sprężystego. Dodatkowo zaproponowano dwa typy geometrii części „obejmowanej”. Pierwszy typ (rys. 2 b, f) był identyczny jak w wariacie pierwszym. W drugim (rys. 2 c, g) zamiast pełnej części walcowej zastosowano część o kształcie połowy walca.



Rys. 2. Druga wersja połączenia zatrzaskowego: a) model części „obejmującej”, b) model części „obejmowanej” typ1, c) model części „obejmowanej” typ2, d) model złożenia, e) widok części „obejmującej”, f) widok części „obejmowanej” typ1, f) widok części „obejmowanej” typ2

Wytworzenie zaprojektowanych części połączenia wymagało zastosowania specjalnych mikronarzędzi umożliwiających obróbkę zewnętrznych i wewnętrznych powierzchni walcowych. Wykonując część „obejmującą” konieczne było zaprojektowanie i wykonanie narzędzia umożliwiającego obróbkę wewnętrznych powierzchni walcowych, gdyż w ogólnodostępnej ofercie handlowej nie ma narzędzia, które umożliwiłoby uzyskanie wymaganego kształtu. Element „obejmowany” wykonano z zastosowaniem frezu do wykonywania promieni zaokrągleń.

3. Metodyka badań

Celem pracy była ocena dokładności wykonania dwóch elementów składających się na połączenie zatrzaskowe po frezowaniu mikronarzędziami.

Obróbkę elementów połączenia przeprowadzono na pionowym centrum obróbkowym Avia VMS 800HS ze sterowaniem Heidenhain iTNC 530. Widok maszyny oraz jej podstawowe parametry przedstawiono na rys. 3.



- przesuw X/Y/Z: 800/540/620 mm,
- max. obroty wrzeciona 24 000 obr/min,
- max. prędkość posuwu 40 m/min,
- dokładność pozycjonowania $\pm 0,005$ mm,
- powtarzalność pozycjonowania 0,005 mm.

Rys. 3. Widok i parametry technologiczne obrabiarki AVIA VMC 800HS

Do wykonania elementów zastosowano szeroko stosowany w przemyśle stop aluminium EN AW-2024 T351, którego skład chemiczny oraz wybrane właściwości mechaniczne przedstawiono w tabeli 1.

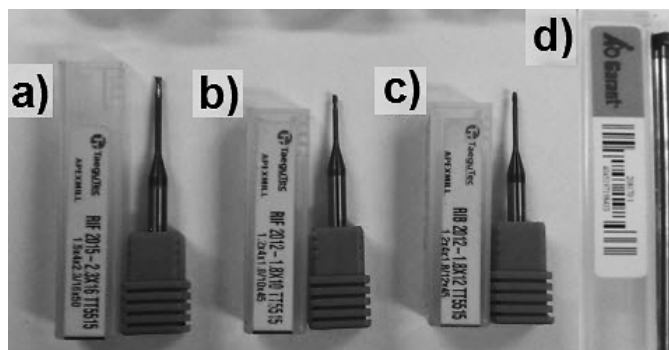
Tab. 1. Skład chemiczny i wybrane właściwości stopu EN AW-2024 [7, 8]

Skład chemiczny	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
	0,5	0,5	3,8 - 4,9	0,3 - 0,9	1,2 - 1,8	0,1	0,25	0,15
Właściwości	Gęstość, ρ	Moduł Younga, E	Wytrzymałość na rozciąganie, R_m		Umowna granica plastyczności, $R_{p0,2}$		Twardość Brinella	
	2,78 g/cm ³	73 GPa	430 MPa		290 MPa		122 HB	

W celu wykonania zaprojektowanych połączeń wykorzystano zestaw mikronarzędzi w skład, którego wchodziły (rys. 4):

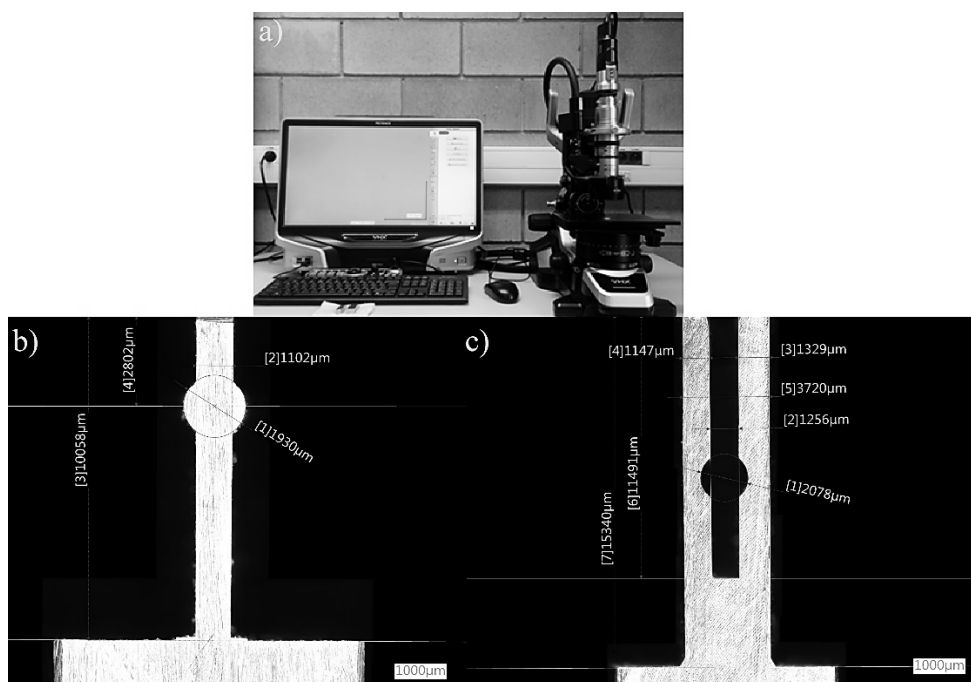
- RIF 2015-2,3x16 TT5515 $\phi 1,5$ mm; z = 2; $a_p = 2,3$ mm; $l_n = 16$ mm - TaeguTec (rys. 4a) – mikrofrez walcowo-czołowy,
- RIF 2012-1,8x10 TT5515 $\phi 1,2$ mm; z = 2; $a_p = 1,8$ mm; $l_n = 10$ mm - TaeguTec (rys. 4b) – mikrofrez walcowo-czołowy,
- RIB 2012-1,8x12 TT5515 $\phi 1,2$ mm; z = 2; $a_p = 1,8$ mm; $l_n = 12$ mm - TaeguTec

- (rys. 4c) – mikrofrez kulisty,
- 208170 $\phi 10$ mm; z = 4; r = 1 mm - Garant (rys. 4d) – frez do obróbki promieni naroży z możliwością obróbki „wstecznej”.



Rys. 4. Zestaw narzędzi zastosowanych do wykonania połączenia: a, b, c) TaeguTec, d) Garant

Oceny dokładności wykonania elementów przeprowadzono w oparciu o wyniki pomiarów uzyskane z zastosowaniem cyfrowego mikroskopu pomiarowego (rys. 5a). Przykłady uzyskanych obrazów podczas pomiaru części „obejmowanej” oraz „obejmującej” przedstawiono na rys. 5b i 5c.



Rys. 5. Mikroskop pomiarowy: a) stanowisko, b) część „obejmowana”, c) część „obejmująca”

W celu statystycznej weryfikacji otrzymanych rezultatów obróbki, pomiary każdego analizowanego wymiaru powtórzono pięciokrotnie.

4. Wyniki badań

Analizując zaprojektowane mechaniczne połączenia zatrzaskowe stwierdzono, że najistotniejsza dla prawidłowego montażu oraz uzyskania odpowiednich warunków wytrzymałościowych jest dokładność wykonania wymiarów oznaczonych literami: A, B, C, D, E i F (rys. 1), których wartości nominalne przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wartości nominalne mierzonych wymiarów

Połączenie zatrzaskowe (wersja 1)						
część „obejmująca”					część „obejmowana”	
A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	
1,2	2,0	3,0	7,0	10,0	2,0	
Połączenie zatrzaskowe (wersja 2)						
część „obejmująca”					część „obejmowana” typ 1	część „obejmowana” typ 2
A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F ₁ [mm]	F ₂ [mm]
1,2	2,0	3,0	2,0	10,0	2,0	2,0

Wyniki pomiarów dla dwóch wersji połączenia przedstawiono w tabeli 3 i 4.

Tab. 3. Wyniki pomiarów dokładności geometrii elementów dla wersji pierwszej połączenia

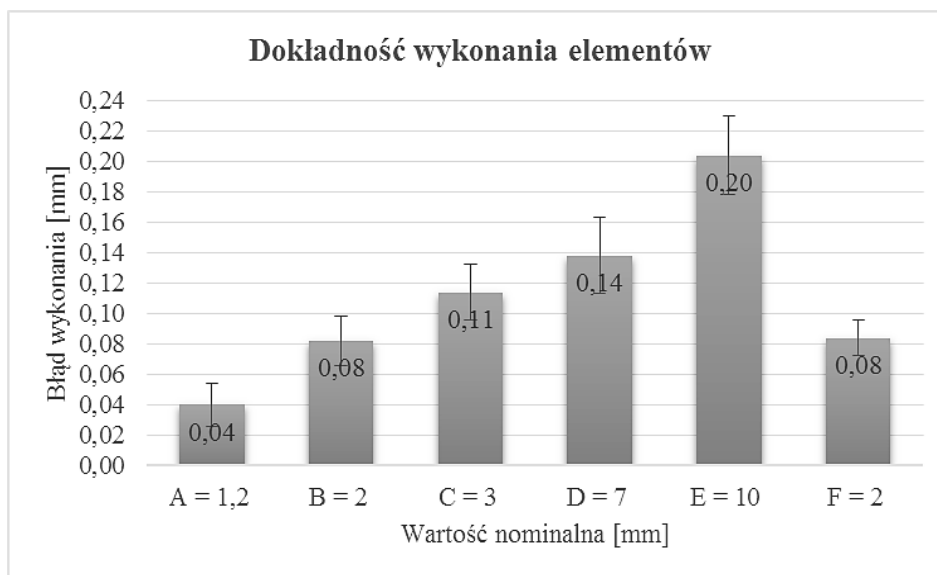
Połączenie zatrzaskowe (wersja 1)						
Lp.	część „obejmująca”					część „obejmowana”
	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]
1	1,24	2,09	3,11	7,14	10,18	1,92
2	1,22	2,09	3,12	7,13	10,20	1,93
3	1,24	2,10	3,09	7,16	10,22	1,91
4	1,24	2,07	3,14	7,10	10,18	1,90
5	1,26	2,06	3,11	7,16	10,24	1,92
Średnia	1,24	2,08	3,11	7,14	10,20	1,92
Odchylenie stand.	0,014	0,016	0,018	0,025	0,026	0,011
Błąd wykonania	0,04	0,08	0,11	0,14	0,20	0,08

Tab. 4. Wyniki pomiarów dokładności geometrii elementów dla wersji drugiej połączenia

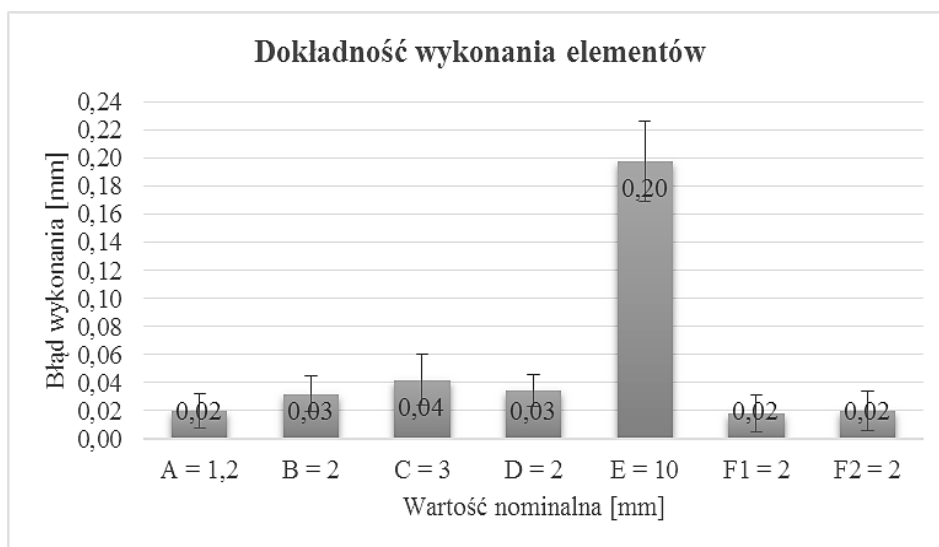
Połączenie zatrzaskowe (wersja 2)							
Lp.	część „obejmująca”					część „obejmowana” typ 1	część „obejmowana” typ 2
	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F ₁ [mm]	F ₂ [mm]
1	1,24	2,05	3,04	1,97	10,20	1,99	2,02
2	1,21	2,02	3,07	1,96	10,22	1,99	2,04
3	1,21	2,03	3,04	1,97	10,15	1,96	2,00
4	1,22	2,04	3,04	1,95	10,22	1,99	2,02
5	1,22	2,02	3,02	1,98	10,20	1,98	2,02
Średnia	1,22	2,03	3,04	1,97	10,20	1,98	2,02
Odchylenie stand.	0,012	0,013	0,018	0,011	0,029	0,013	0,014
Błąd wykonania	0,02	0,03	0,04	0,03	0,20	0,02	0,02

Jako wskaźnik określający dokładność wykonania elementów po obróbce mikronarzędziami przyjęto błąd wykonania, który jest różnicą pomiędzy wartością wymiaru nominalnego a otrzymaną wartością zmierzoną.

Na rys. 6 i rys. 7 przedstawiono błąd wykonania [mm] w funkcji wartości wymiarów nominalnych [mm] dla dwóch wariantów mechanicznego połączenia zatrzaskowego.



Rys. 6. Błąd wykonania [mm] w funkcji wartości wymiarów nominalnych [mm] dla pierwszej wersji połączenia



Rys. 7. Błąd wykonania [mm] w funkcji wartości wymiarów nominalnych [mm] dla drugiej wersji połączenia

Na obu wykresach (rys. 6 i rys. 7) dodano słupki błędów odpowiadające obliczonemu odchyleniu standardowemu. Analizując błąd wykonania w funkcji wartości wymiarów nominalnych w dwóch wariantach połączenia zatrzaskowego zauważono wyraźny wzrost błędu wykonania wraz ze wzrostem wartości wymiaru nominalnego.

Z punktu widzenia możliwości wykonania połączenia zatrzaskowego dla rozpatrywanych próbek najistotniejsze znaczenie mają dokładność wykonania wymiarów: A – szerokość rowka, B – średnica powierzchni walcowej części „obejmującej” oraz wymiar F – średnica powierzchni walcowej części „obejmowanej” (rys. 1). Na ewentualne powstanie odkształcenia plastycznego części „obejmującej” wpływ mają również wartość wymiaru D – odległość osi części walcowej od górnej krawędzi zatrzasku oraz E – głębokość rowka części „obejmującej”. Dokładność wykonania tych wymiarów jest jednak mniej istotna dla poprawności połączenia w stosunku do wymiarów A, B i F. Na podstawie danych przedstawionych w tab. 3 i tab. 4 oraz na rys. 6 i rys. 7 można stwierdzić, że dla tych trzech najistotniejszych wymiarów uzyskano zadawalające wartości odchyłek, szczególnie dla drugiej wersji połączenia, gdzie błąd wykonania nie przekroczył 0,03 mm (rys. 7). Analizując dane z tab. 3 i tab. 4 można jednocześnie zaobserwować, że dla powierzchni walcowych części „obejmowanej” i „obejmującej” połączenia uzyskano zerowe lub dodatnie wartości luzów, co zapewniło poprawne łączenie obydwu części (bez deformacji poszczególnych elementów połączenia).

5. Analiza wyników oraz wnioski

Analiza uzyskanych wyników pomiarów dokładności wymiarów oraz obserwacje procesu obróbki, pozwalają sformułować następujące, ważniejsze wnioski i ustalenia:

- A. Na podstawie uzyskanych wyników zauważono wyraźny wzrost błędu wykonania wraz ze wzrostem wartości wymiaru nominalnego.
- B. Głównym problemem w wykonaniu tego rodzaju połączenia zatrzaskowego okazała

się duża prędkość, wymagana do uzyskania głębokich rowków mikrofrezami trzpieniowymi

- C. Kłopotliwe technologicznie jest wykonanie wewnętrznej powierzchni walcowej w „obejmującej” części połączenia.
- D. W przypadku obydwu typów „obejmowanej” części połączenia, ich wykonanie jest znacznie łatwiejsze i możliwe na obrabiarkę 3-osiowej, przy wykorzystaniu narzędzi dostępnych w ofercie handlowej.
- E. Prawidłowość funkcjonowania zatrzasku jest uwarunkowana wzajemnymi relacjami wymiarów przedstawionych na rys. 1.
- F. Dokładność elementów na uzyskanym poziomie pozwoliła na uzyskanie prawidłowego połączenia zatrzaskowego (bez odkształceń plastycznych).

Literatura

1. Grzesik W.: Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2010.
2. Zawora J.: Podstawy technologii maszyn. WSiP, Warszawa, 2008.
3. Cai L., Zhang Z., Cheng Q., Liu Z., Gu P., Qi Y.: An approach to optimize the machining accuracy retainability of multi-axis NC machine tool based on robust design. Precision Engineering, 43, 2016, 370-386.
4. Gawlik J., Zębala W.: Kształtowanie jakości wyrobów w obróbce precyzyjnej. Mechanik, 12, 2011, 6-7.
5. Maj P., Miko E.: Ocena dokładności wykonania czopa okrągłego z wykorzystaniem różnych strategii obróbkowych na pionowym centrum frezarskim. Mechanik, 10, 2016, 1414-1415.
6. Xu K., Zoua B., Wang Y., Guo P., Huang C., Wang J.: An experimental investigation of micro-machinability of aluminum alloy 2024 using Ti (C7N3)-based cermet micro end-mill tools. Journal of Materials Processing Technology, 235, 2016, 13-27.
7. PN-EN 485-2:2014-02: Aluminium i stopy aluminium. Blachy, taśmy i płyty. Część 2: Własności mechaniczne. Tolerancje kształtu i wymiarów wyrobów walcowanych na zimno.
8. PN-EN 573-3:2010: Aluminium i stopy aluminium. Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie. Część 3: Skład chemiczny i rodzaje wyrobów.

Prof. dr hab. inż. Józef KUCZMASZEWSKI

Dr inż. Paweł PIEŚKO

Mgr inż. Magdalena ZAWADA-MICHAŁOWSKA

Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji

Politechnika Lubelska

20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36

tel./fax: (0-81) 538 42 27

e-mail: j.kuczmaszewski@pollub.pl

p.piesko@pollub.pl

m.michalowska@pollub.pl