

Agnieszka FURMANOWICZ, Józef KUCZMASZEWSKI, Paweł PIEŚKO
Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36D; 20-618 Lublin, Polska
e-mail: j.kuczmaszewski@pollub.pl; p.piesko@pollub.pl;

Odkształcenia sprężyste struktury tworzywo epoksydowe – metal przy frezowaniu czołowym

Streszczenie: Skrawalność tworzyw epoksydowych istotnie różni się od skrawalności metali. W dużym stopniu decyduje o tym różnica w wartościach modułu Younga tych materiałów. W wielu współczesnych konstrukcjach stosuje się elementy których fragmenty zbudowane są zarówno z metali jak i tworzywo polimerowych. Z takimi sytuacjami spotykamy się również w konstrukcjach sklepanych. W niektórych przypadkach takie elementy są równocześnie obrabiane w procesach skrawania. Podatność na odkształcenia pod wpływem sił skrawania, różna dla elementów metalowych i dla tworzyw polimerowych, może być przyczyną błędów wymiarów. W pracy frezowano strukturę stop aluminium – tworzywo epoksydowe i analizowano różnice wartości odkształcenia po obróbce. Przedstawiono wyniki badań oraz wnioski.

Słowa kluczowe: tworzywa epoksydowe, frezowanie, odkształcenie sprężyste.

ELASTIC DEFORMATION OF THE SYSTEM EPOXY MATERIAL – METAL DURING FACE MILLING

Abstract: A machinability of epoxide plastics is significantly different than machinability of metals. The differences of Young modulus of these materials are mainly deciding about this. A lot of modern constructions are build both from metals and plastics. The same situation we observe in adhesive joints of different materials. In some cases these elements are machined simultaneously. The deformability of elements affected by cutting forces is different for metal and plastics, so it makes a contribution to dimensional error. The metal-epoxide structures were machined and the differences in their strain after machining were analysed. In the end of the paper the results and conclusions were presented.

Keywords: epoxide, milling, the elastic deformation.

1. WSTĘP

Tworzywa epoksydowe, dzięki wielu interesującym właściwościom, stały się ważnym materiałem w przemyśle, zwłaszcza maszynowym, budownictwie, transporcie i lotnictwie. Znajdują one zastosowanie jako tworzywa konstrukcyjne, adhezyjne i powłokowe. Tworzywa epoksydowe konstrukcyjne są wykorzystywane w budowie korpusów maszyn, jako polimerobeton, półfabrykaty na elementy typu płyty, dźwignie, pokrywy, również jako masy zalewowe i wiele innych. Tworzywa epoksydowe adhezyjne są znane i cenione jako uniwersalne kleje i kity [1,2], jako tworzywa powłokowe, przede wszystkim w postaci bardzo dobrej jakości farb i lakierów.

Takie różnorodne zastosowania tworzyw epoksydowych, w wielu przypadkach implikują konieczność ich obróbki, w tym obróbki skrawaniem. Czasem mamy do czynienia z konstrukcją warstwową lub złączem adhezyjnym metalu z tworzywem epoksydowym, na przykład w procesach napraw i regeneracji. Zawsze w takich przypadkach musimy zdawać sobie sprawę z tego, że sztywność na rozciąganie i ściskanie epoksydów w stanie utwardzonym oraz metali, takich jak stal, stopy aluminium czy stopy tytanu jest istotnie różna. Należy więc spodziewać się różnych odkształceń sprężystych podczas obróbki tych materiałów i, w konsekwencji, różnic wymiarów geometrycznych fragmentów konstrukcji wykonanych z tworzywa epoksydowego i metalu.

2. OBRÓBKA SKRAWANIEM TWORZYW EPOKSYDOWYCH

Skrawalność tworzyw epoksydowych jest w dużym stopniu uzależniona od rodzaju zastosowanej żywicy, rodzaju utwardzacza i modyfikatorów, takich jak napełniacze, stabilizatory, antystatyki, antypiryny, barwniki i in. Obrabialność tworzyw polimerowych jest dość dobrze skorelowana z ich sztywnością na rozciąganie i ściskanie. Tworzywo bardziej elastyczne mocniej ugina się pod ostrzem. W konsekwencji występuje intensywne tarcie materiału na powierzchni przyłożenia i wzrost zużycia narzędzia oraz większe odchyłki wymiarów i kształtu obrabianych elementów. Wśród tworzyw polimerowych epoksydy należą raczej do grupy materiałów łatwo obrabialnych. Literatura na ten temat nie jest zbyt bogata. W Polsce pierwsze prace na ten temat podejmował, już w latach 70-tych ubiegłego wieku, J. Darlewski [3]. Przy obróbce materiałów polimerowych należy pamiętać, że już

w stosunkowo niskiej temperaturze (dla niektórych epoksydów jest to już ponad 60°C) następują procesy destrukcji chemicznej, nie należy więc dopuszczać do takich sytuacji. Ponadto warto uwzględnić znaczną wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej oraz powstające zapylenie w strefie skrawania.

3. PROGRAM BADAŃ I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

Celem badań było określenie, w wyniku badań doświadczalnych, wpływu rodzaju zastosowanego utwardzacza oraz wybranych parametrów technologicznych na wielkość odkształcenia sprężystego układu materiałowego metal-tworzywo epoksydowe w procesie frezowania frezem trzpieniowym, a przede wszystkim określenie różnicy tego odkształcenia pomiędzy stopem aluminium i tworzywem epoksydowym.

Dla realizacji zadań badawczych wykonano odpowiednie próbki, przykład takiej próbki przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Widok próbki z wykonanymi rowkami wypełnionymi tworzywem epoksydowym

Fig. 1. The view of the sample made with the grooves filled with epoxide.

W płycie ze stopu aluminium EN AW-2024 [4] o grubości 10 mm, wykonano frezem trzpieniowym rowki o szerokości i głębokości 8 mm, które wypełniono następującymi tworzywami:

- E5/ET
- E5/TFF
- E5/IDA
- E6/ET
- E6/TFF
- E6/IDA.

Zdecydowano się na żywice Epidian 5 i Epidian 6, [5, 6] gdyż są one najczęściej stosowane w tych obszarach techniki, które przedstawiono we wstępie pracy.

Wybór utwardzaczy podyktowany był tym, że są one wykorzystywane w dużym stopniu tam, gdzie ich odkształcenia w trakcie obróbki mogą mieć istotne znaczenie. Przykładowo aminowy utwardzacz IDA [7], będący mieszaniną alkoholu benzyłowego oraz adduktu izoforono-

diaminy, stosowany jest najczęściej do wykonywania mas posadzkowych.

Utwardzacz TFF [8] to oligomeryczny produkt reakcji fenolu i trietylenotetraminy. Charakteryzuje się on dużą reaktywnością, używany jest najczęściej w budownictwie.

ET [9] jest utwardzaczem aminowym stosowanym do ciekłych żywic epoksydowych oraz kompozycji wytworzonych na ich bazie. Używa się go między innymi do utwardzania szpachlówek oraz kitów epoksydowych, roztworów gruntujących oraz klejów epoksydowych.

Wykonane kompozycje epoksydowe zalewano do wykonanych rowków. Po utwardzeniu i 7-dobowym sezonowaniu frezowano je [10] tak jak pokazano to na rys. 2.



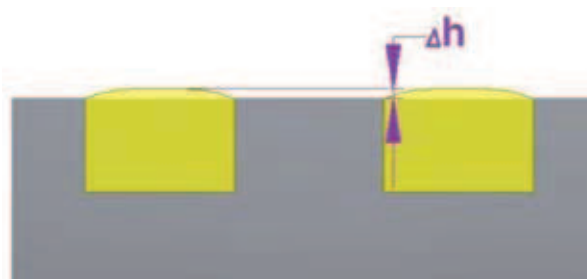
Rys. 2. Widok przygotowanego stanowiska do frezowania próbek: Centrum frezarskie AVIA VMC 800 HS

Fig. 2. View of the prepared positions for milling samples: Machining center AVIA VMC 800 HS

Analizowanymi parametrami chropowości były:

- Ra – średnia arytmetyczna bezwzględnych wartości rzędnych profilu wewnątrz odcinka elementarnego,
- RMS – średnia kwadratowa odchylenia profilu na odcinku elementarnym,
- Rz – średnia arytmetyczna wartość bezwzględnych wysokości pięciu najwyższych wzniesień i pięciu najniższych wgłębień na odcinku elementarnym.

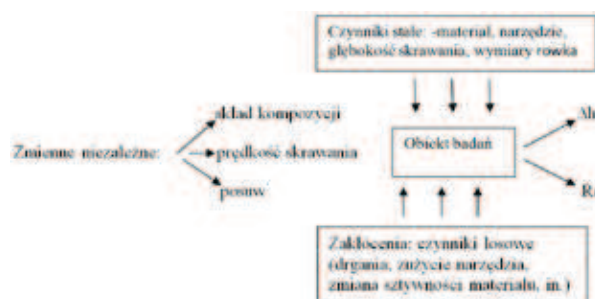
Istotę wartości Δh , czyli różnicę współrzędnych punktów pomiarowych mierzonych na środku ścianek metalu i tworzywa epoksydowego przedstawiono, celowo eksponując różnicę w wysokości ścianek, na rys. 3.



Rys. 3. Wielkość Δh i sposób jej pomiaru

Fig. 3. The size of Δh and how it was measured

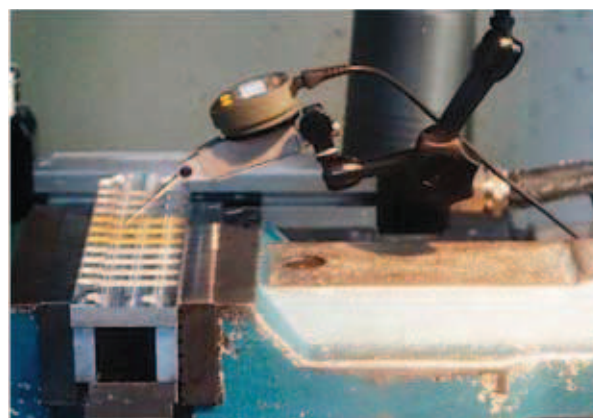
Ogólny schemat badań przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Ogólny schemat eksperymentu

Fig. 4. General scheme of the experiment

Próby skrawania wykonano frezem trzpieniowym 202553 o średnicy 12 mm dedykowanym do obróbki stopów Al [14].



Rys. 5. Pomiar wartości odkształceń na stanowisku do obróbki

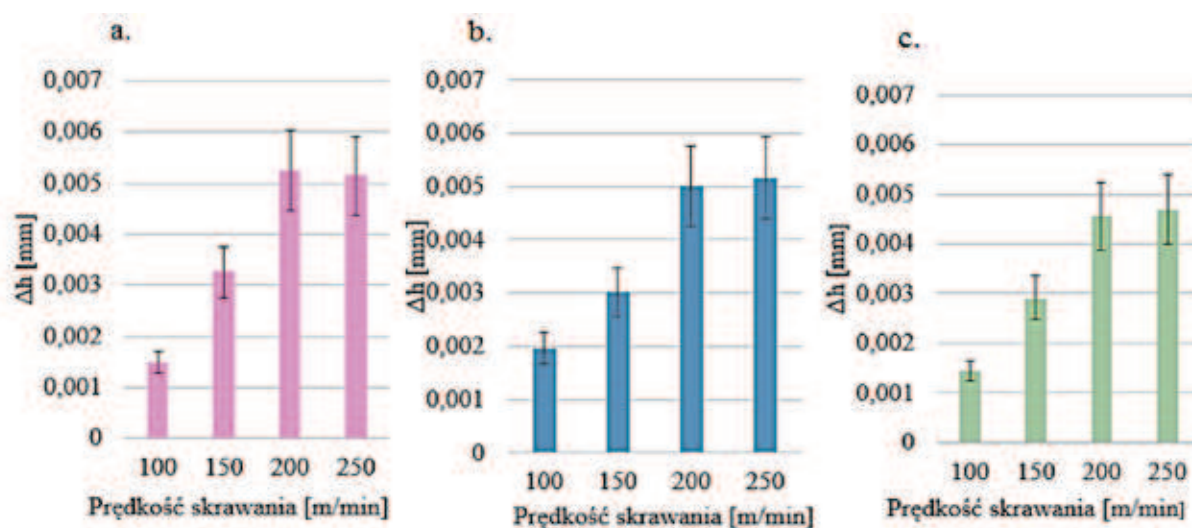
Fig. 5. Measurement of strain on post processing

Odształcenia mierzono bezpośrednio na obrabiarce przy użyciu czujnika elektronicznego, który posiada możliwość rejestracji pomiarów on-line na PC, jak pokazano na rys. 5.

WYNIKI BADAŃ

Na rys. 6 przedstawiono wyniki pomiarów wartości Δh czyli różnicy między wysokością

rowka wypełnionego tworzywem epoksydowym, a ścianką wykonaną ze stopu Al. Przedstawione na rys. 6 wyniki są średnią z 46 pomiarów przeprowadzonych na środku rowka i ścianki, jak przedstawiono na rys. 3. Należy podkreślić, że w założeniach badawczych nie uwzględniono faktu, że wartość Δh może być mniejsza w pobliżu granicy faz, ze względu na wpływ adhezji przeciwdziałającej odkształceniom.



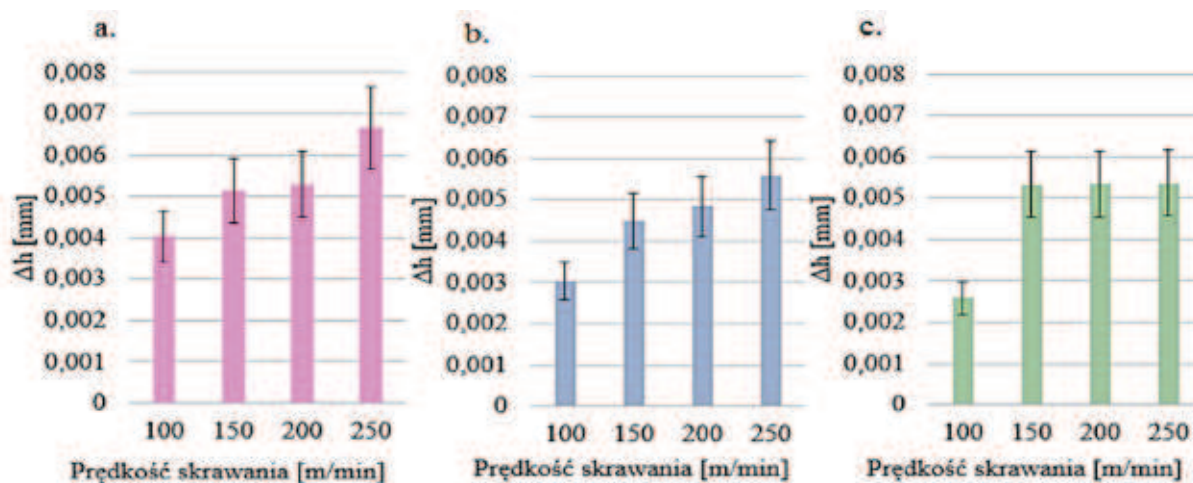
Rys. 6. Wpływ prędkości skrawania na różnicę wymiarów pomiędzy tworzywem epoksydowym a stopem Al dla różnych utwardzaczy: a) E5+ET, b) E5+TFF, c) E5+IDA

Fig. 6. Effect of the cutting speed on the size difference between the epoxide and Al alloy for different hardeners: a) E5 + ET, b) E5 + TFF c) E5 + IDA

Jak można zauważyć, wartość Δh rośnie wraz ze wzrostem prędkości skrawania, ale po przekroczeniu wartości 200 m/min wartość odkształcenia stabilizuje się. Obserwuje się to dla wszystkich stosowanych utwardzaczy dla żywicy E5. Wartości największych odkształceń są w zasadzie zbliżone, choć dla utwardzacza IDA są one minimalnie mniejsze. Interpretacja tych wyników nie jest łatwa. Z pewnością odkształcenia mają związek z wartością sił skrawania, jak wiadomo rosną

one wraz ze wzrostem prędkości skrawania, ale po przekroczeniu pewnej prędkości obserwuje się ich spadek. Ekstremum funkcji $F_s = f(v)$ przypada na różne wartości v_c dla różnych materiałów. Prawdopodobnie jakiś wpływ ma także głębokość rowka, ten wpływ pominięto, zakładając, że istotą badań był aspekt porównawczy.

Na rys. 7 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na wartość Δh dla żywicy E6 utwardzanej identycznie jak E5.



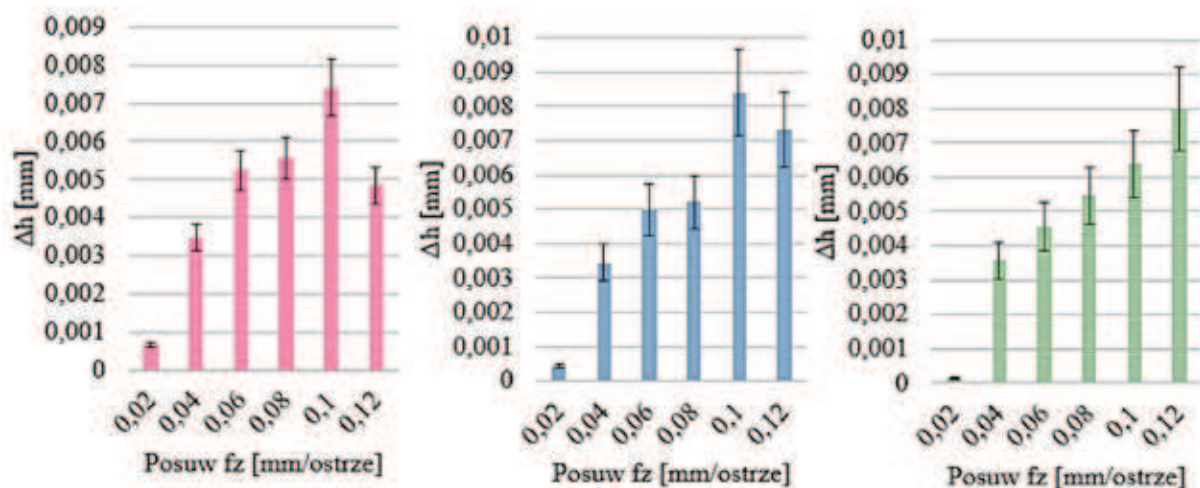
Rys. 7. Wpływ prędkości skrawania na różnicę wymiarów pomiędzy tworzywem epoksydowym a stopem Al dla różnych utwardzaczy: a) E6+ET, b) E6+TFF, c) E6+IDA

Fig. 7. The effect of cutting speed on the difference between the dimensions of Epoxy and Al alloy for the different hardener: a) the E6 + ET, b) TFF E6 + c) + E6 IDA

Z wyników pomiarów przedstawionych na rys. 7 wynika, że kompozycje wykonane na bazie żywicy E6 są bardziej podatne na odkształcenia sprężyste niż kompozycje oparte na żywicy E5. Charakter zależności jest podobny, choć dla utwardza-

cza IDA w granicach prędkości skrawania $v_c = 150 - 250$ m/min obserwowano stabilizację wartości Δh .

Na rys. 8 przedstawiono wpływ prędkości ruchu posuwowego na wartość Δh dla kompozycji opartych na żywicy E5.



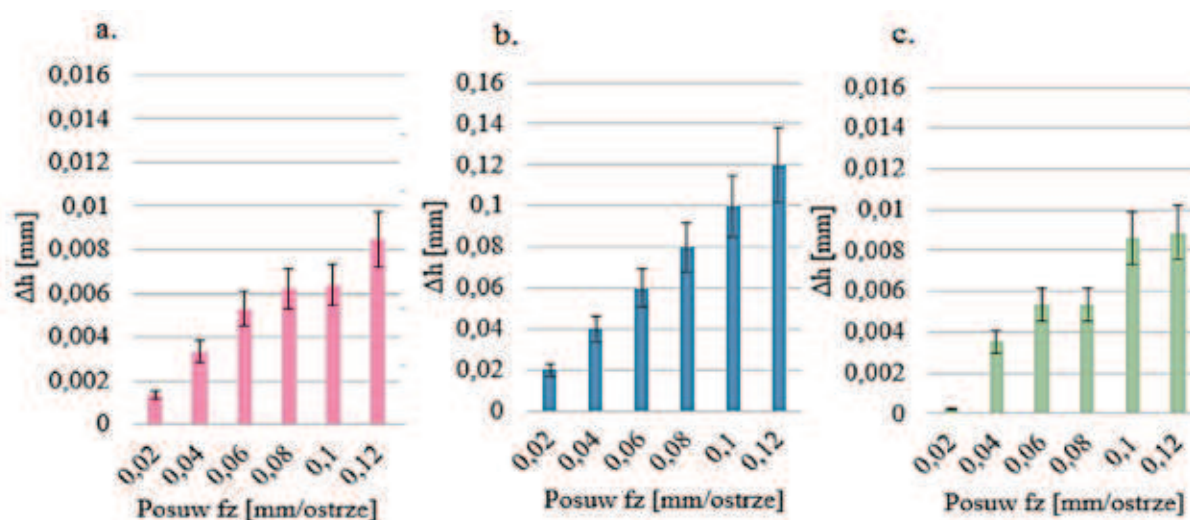
Rys. 8. Wpływ prędkości posuwu na różnicę Δh pomiędzy tworzywem epoksydowym a stopem Al dla różnych utwardzaczy: a) E5+ET, b) E5+TFF, c) E5+IDA

Fig. 8. Effect of the feed rate of the difference Δh between epoxide and Al alloy for different hardeners: a) E5 + ET, b) E5 + TFF c) E5 + IDA Wyniki badań wskazują, że dla utwardzaczy ET i TFF można zaobserwować największe odkształcenia dla $f_z = 0,1$ mm/strze, dla $f_z = 0,12$ mm/strze wartość Δh wyraźnie spadła. Nie obserwuje się tego natomiast dla utwardzacza IDA.

Wartości Δh wskazują, że posuw silniej wpływa na odkształcenia niż prędkość skrawania. Oznacza to, że intensyfikując wydajność, z punktu widzenia dokładności wymiarowej, korzystniej jest zwiększać prędkość

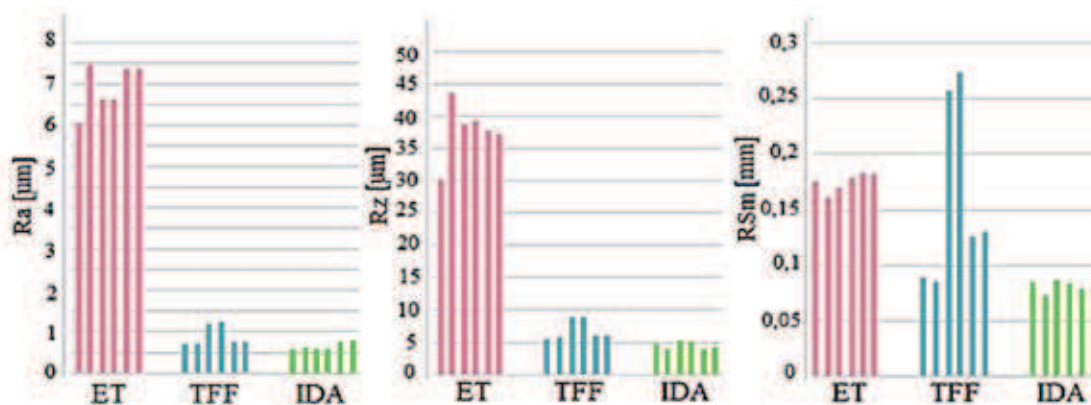
skrawania niż posuw, o ile oczywiście nie występują inne przyczyny, które nie pozwalają na taki wzrost.

Na rys. 9 przedstawiono podobne zależności dla kompozycji opartych na żywicy E6.



Rys. 9. Wpływ posuwu na wartość różnicy wymiarów pomiędzy tworzywem epoksydowym a stopem Al dla różnych utwardzaczy: a) E6+ET, b) E6+TFF, c) E6+IDA

Fig. 9. Effect of feed rate on the value of the difference in size epoxy resin and Al alloy for the different hardener: a) the E6 + ET, b) TFF E6 + c) + E6 IDA



Rys. 10. Parametry R_a , R_z oraz R_{Sm} dla żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczami ET, TFF oraz IDA dla frezowania przy $v_c=200$ m/min, $f_z=0,12$ mm/ostre

Fig. 10. The parameters R_a , R_z and R_{Sm} for epoxy resin Epidian 5 hardeners ET, TFF and the IDA for milling at $v_c = 200$ m / min, $f = 0.12$ mm / tooth

Wyniki przedstawione na rys. 9 wskazują na silną korelację posuwu i wartości Δh . Największą bezwzględną wartość Δh zaobserwowano dla utwardzacza TFF, a najmniejszą dla utwardzacza IDA.

Dla analizowanych kompozycji epoksydowych, dla wybranych wartości technologicznych parametrów obróbki, wykonano także pomiary chropowatości powierzchni tworzywa po frezowaniu trzpieniowym frezem walcowo-czo-

łowym, których wyniki przedstawiono na rys. 10. Pomiary prowadzono w kierunku dłuższego wymiaru rowka w jego strefie środkowej.

Przedstawione na rys. 10 wyniki są interesujące. Wskazują one jednoznacznie, że największą wartość parametrów chropowatości uzyskano dla utwardzacza ET, dla którego wartość Ra jest ok. siedmiokrotnie wyższa w stosunku do pozostałych utwardzaczy. Najbardziej stabilną wartością chropowatości charakteryzowały się kompozycje wykonane z utwardzaczem IDA. Na rysunku 10 nie przedstawiono wartości średniej z kilku pomiarów, a pojedyncze słupki w konkretnym kolorze oznaczają wynik pojedynczego oznaczenia parametru.

WAŻNIEJSZE WNIOSKI

Na podstawie analizy literatury oraz przeprowadzonego eksperymentu, także dyskusji uzyskanych wyników, można sformułować następujące ważniejsze wnioski:

Potwierdzono hipotezę, że w procesie obróbki frezowaniem konstrukcji złożonych z tworzywa epoksydowego i stopu aluminium występują różnice wymiarów geometrycznych jako efekt różnych odształceń sprężystych tych materiałów w trakcie obróbki.

Analizując wartość Δh dla różnych technologicznych parametrów obróbki najbardziej korzystną kompozycją z punktu widzenia dokładności geometrycznej układu jest kompozycja E5/IDA.

Kompozycje oparte na żywicy epoksydowej E6, dla zastosowanych utwardzaczy, są bardziej podatne na odształcenia niż kompozycje z E5.

Wraz ze wzrostem prędkości skrawania i posuwu rosną różnice wysokości ścianek pomiędzy tworzywem epoksydowym a stopem aluminium.

Porównując wybrane parametry chropowatości powierzchni po frezowaniu czołowym frezem trzpieniowym, można stwierdzić, że najbardziej gładkie powierzchnie uzyskać można stosując utwardzacz IDA.

Porównując parametry chropowatości dla analizowanych żywic można stwierdzić, że lepszą jakość powierzchni po obróbce frezowaniem uzyskuje się w przypadku Epidianu 5.

Należy przypuszczać, że obserwowane zjawisko, polegające na występowaniu uskoków w wartościach wymiarów geometrycznych po obróbce skrawaniem będzie występowało także dla innych kompozycji epoksydowych, również dla innych tworzyw polimerowych obrabianych wspólnie w złożonych konstrukcjach tworzywo polimerowe – metal.

LITERATURA

1. Kuczmaszewski J.: *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*. Politechnika Lubelska. Oddział Lubelski PAN, Lublin, 2006.
2. Brojer Z., Hertz Z., Penczek P., *Żywice epoksydowe*, Wydanie drugie całkowicie zmienione, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1972.
3. Darlewski J.: *Obróbka skrawaniem tworzyw sztucznych warstwowych*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1978–1990.
4. Dobrzański L. A., *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2006, Wyd. 2 zm. i uzup.
5. Czub P., Bończa-Tomaszewski Z., Penczek P., Pieli-chowski J., *Chemia i technologia żywic epoksydowych*, Wydanie czwarte zmienione, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2002.
6. Bereska B., Iłowska J., Czaja K., Bereska A., *Utwardzacze do żywic epoksydowych*, Przemysł Chemiczny 2014, T. 93, nr 2, s. 443–448.
7. <http://krisko.lublin.pl/chemia/zywice-epoksydowe-posadzkowe-wylewki-epoksydowe/utwardzacze-do-zywic-epoksydowych/utwardzacz-ida/utwardzacz-ida-v-1-kg.html>, 22.04.2016.
8. <http://krisko.lublin.pl/chemia/zywice-epoksydowe-posadzkowe-wylewki-epoksydowe/utwardzacze-do-zywic-epoksydowych/utwardzacz-tff/utwardzacz-tff-v-1-kg.html>, 22.04.2016.
9. <http://krisko.lublin.pl/chemia/zywice-epoksydowe-posadzkowe-wylewki-epoksydowe/utwardzacze-do-zywic-epoksydowych/utwardzacz-et/utwardzacz-et-v-1-kg-1.html>, 22.04.2016.
10. Kuczmaszewski J., Zaleski K., Praca zbiorowa pod red. *Obróbka skrawaniem stopów aluminium i magnezu*. Politechnika Lubelska, Lublin 2015.

Publikację przyjęto do druku: 31.05.16