

Zautomatyzowane stanowisko do diagnozowania procesów szlifowania

Grinding processes automated diagnostic test stand

MARCIN ŻÓŁKOŚ
MAREK KROK
JANUSZ PORZYCKI
JANUSZ ŚWIDER
MAREK GRABOWY*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.122>

Przedstawiono zautomatyzowane stanowisko pomiarowe które bazuje na zmodyfikowanym centrum obróbkowym Haas VF-2YT. Stanowisko to umożliwi efektywne prowadzenie badań doświadczalnych procesów szlifowania konwencjonalnego oraz wspomaganego drganiami ultradźwiękowymi obrabianego przedmiotu (UAG). Omówiono poszczególne tory pomiarowe oraz rozwiązania automatyzujące proces akwizycji danych pomiarowych w trakcie prowadzenia badań eksperymentalnych. Szczególną wagę poświęcono układowi do pomiaru składowych siły szlifowania.

SŁOWA KLUCZOWE: zautomatyzowane stanowisko pomiarowe, szlifowanie, pomiar sił w procesie szlifowania, UAG

Presented is the automated measuring test stand based on the modified Haas VF-2YT machining center. That allows conducting experimental research of conventional and assisted with workpiece ultrasonic oscillations grinding processes (UAG). Respective measurement paths and automated measurement data acquisition process during the experimental research was discussed. Particular notice was given to grinding force components measurement system.

KEYWORDS: automated test stand, grinding, measurement of forces in grinding process, UAG

W obecnych czasach konwencjonalne techniki szlifowania okazują się mało wydajne w obliczu obróbki nowych – ciągle rozwijanych – twardych i kruchych materiałów. Dlatego coraz częściej stosuje się hybrydowe procesy szlifowania, w których jednym z dodatkowych źródeł energii mogą być drgania ultradźwiękowe, wspomagające proces obróbki poprzez drgania narzędzia lub przedmiotu obrabianego [1].

Najbardziej rozpowszechnionym hybrydowym procesem obróbki ścierniej jest szlifowanie wspomagane oscylacjami narzędzia – o czym świadczy dostępność maszyn produkcyjnych przystosowanych do tego rodzaju obróbki. Natomiast do procesu szlifowania wspomaganego ultradźwiękowo – UAG (*ultrasonic assisted grinding*) – z drgającym przedmiotem obrabianym nie ma gotowych rozwiązań produkcyjnych, choć metoda oferuje więcej odmian kinematycznych w porównaniu ze szlifowaniem wspomaganym oscylacjami narzędzia [2].

Badania wykazują, że wprowadzenie drgań ultradźwiękowych do procesu szlifowania ma pozytywny wpływ zarówno na żywotność narzędzi, jak i jakość powierzchni oraz wartości siły szlifowania [1–3]. Dlatego konieczne jest kontynuowanie badań nad określeniem optymalnych parametrów technologicznych UAG oraz ich wpływu na wskaźniki jakościowe tego procesu, m.in. chropowatość powierzchni i dokładność kształtowo-wymiarową. Rezul-

tatem końcowym tych badań powinno być opracowanie modeli matematycznych opisujących zależności w procesie szlifowania i pozwalających dobrać parametry wejściowe na podstawie zakładanych efektów wyjściowych.

Aby uzyskać wiarygodne wyniki, konieczne jest przeprowadzenie odpowiedniej liczby pomiarów wielu parametrów wejściowych (prędkości obwodowej ściernicy, posuwu, dosuwu, amplitudy drgań, kierunku drgań itd.). Rozbudowuje to istotnie plan badawczy, co wymusza automatyzację procesu zbierania i przetwarzania danych pomiarowych, by zapewnić jego efektywność. W tym właśnie celu zostało zaprojektowane i zbudowane stanowisko pomiarowe pozwalające na prowadzenie badań procesu szlifowania ze wspomaganie drganiami ultradźwiękowymi przedmiotu obrabianego i bez wspomaganie.

Kompletne stanowisko badawcze składało się z centrum obróbkowego CNC ze zintegrowanym układem wzbudzenia drgań ultradźwiękowych, wspomagających proces szlifowania, oraz trzech układów pomiarowych (rys. 1).

Pierwszy układ służył do pomiarów amplitudy drgań przedmiotu obrabianego. Umożliwiał sprawdzanie sonotrod i odpowiednie dobieranie parametrów pracy falowodu, by osiągnąć zakładaną wartość amplitudy. Drugi układ służył do rejestrowania sił występujących w procesie szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękami i bez niego. Natomiast trzeci układ odpowiadał za pomiary chropowatości powierzchni uzyskanej po każdym przejściu obróbkowym [4].



Rys. 1. Zautomatyzowane stanowisko diagnostyczne procesów szlifowania [4]

Centrum obróbkowe CNC

Jako bazę stanowiska badawczego, przygotowanego na potrzeby projektu PBS2/B6/17/2013 [4], do badań procesów szlifowania ze wspomaganie oscylacjami przedmiotu obrabianego wykorzystano pionowe centrum obróbkowe Haas VF-2YT. Na oryginalnej wersji obrabiarki nie było możliwe wspomaganie procesów obróbki za pomocą drgań ultradźwiękowych, głównie ze względu na ograniczenia układu sterowania Haas, które nie pozwalały na dostosowanie jego konfiguracji do potrzeb sterowania generatorem ultradźwiękowym. Dodatkową przeszkodą był brak udostępnionego przez producenta

* Mgr inż. Marcin Żółkoś (markos@prz.edu.pl), mgr inż. Marek Krok (mkrok@prz.edu.pl), prof. nadzw. dr hab. inż. Janusz Porzycki (jpor@prz.edu.pl) – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej; dr inż. Janusz Świder (swider@cerel.pl), dr inż. Marek Grabowy (grabowy@cerel.pl) – Instytut Energetyki, Oddział Ceramiki CEREL

oprogramowania do tworzenia programów PLC oraz dodawania dodatkowych ekranów obsługi. W związku z tym utworzenie stanowiska pomiarowego do badania procesów szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękami wymagało przeprowadzenia szeregu modyfikacji centrum obróbkowego.

W głównej mierze opierały się one na wymianie układu sterującego na układ Sinumerik 840D sl wraz ze wszystkimi tego konsekwencjami (m.in. wymianą szafy sterującej, modułów napędowych, jednostki centralnej, wejść i wyjść sterownika PLC oraz pulpitu sterującego). Oprócz tego, aby umożliwić automatyczne sterowanie generatorem ultradźwięków za pomocą układu NC maszyny bezpośrednio z programów obróbkowych, konieczne było wprowadzenie zmian w programie PLC przez dodanie dodatkowych funkcji pomocniczych M (sterujących włączaniem i wyłączaniem generatora oraz włączaniem i wyłączaniem chłodzenia wzbudnika) i ekranów obsługi, umożliwiającymi określanie poszczególnych parametrów generatora [4].

Programy sterujące pisane na potrzeby badań eksperymentalnych składają się z szeregu powtarzających się cyklicznie ruchów maszyny przy zmieniających się parametrach technologicznych. Z myślą o optymalizacji przygotowywania takich programów opracowano własne cykle obróbkowo-pomiarowe, ułatwiające programowanie stanowiska:

- SET_TECH – cykl ustawiający odpowiednie wartości prędkości szlifowania i prędkości posuwu oraz włączający drgania ultradźwiękowe, dopływ chłodziwa i chłodzenie wzbudnika,
- UNSET_TECH – cykl sterujący wzbudnikiem (wyłączenie drgań z pozostawionym chłodzeniem wzbudnika) bez ingerencji w parametry technologiczne,
- MARKER – cykl znakowania, sterujący sygnałem (za pomocą funkcji pomocniczych M93 i M94) wyprowadzonym z PLC w celu numerowania kolejnych przejść pomiarowych w pliku TDMS,
- CUTTING – cykl szlifowania powierzchni dla dowolnej głębokości szlifowania, uwzględniający przejścia wyskrzające oraz wykorzystujący wyjście PLC (sterowane funkcjami pomocniczymi M91 i M92) do rozpoczęcia i zakończenia akwizycji danych z pojedynczego przejścia pomiarowego.

Dodatkowo zaimplementowano własny postprocesor (wykorzystujący cykle użytkownika) automatyzujący proces tworzenia programów technologicznych na podstawie określonego planu badawczego, uwzględniający również konieczne przerwy na pomiary chropowatości.

Układ wzbudzający drgania ultradźwiękowe

Najważniejszą częścią całego stanowiska badawczego jest układ wzbudzania drgań ultradźwiękowych (rys. 2), na który składają się następujące elementy:

- Generator – urządzenie generujące wysokoczęstotliwościowy prąd przemienny do zasilania przetwornika. W omawianym przypadku wykorzystano uniwersalny generator przeznaczony do stosowania w procesach spajania ultradźwiękowego. Wyprodukowany przez firmę MP Interconsulting model WG-1000 W ma moc maksymalną rzędu 1000 W i zakres pracy od 20 do 100 kHz [4–6].
- Przetwornik (*transducer*) – zamieniający prąd przemienny o częstotliwości rezonansowej elementów mechanicznych przetwornika poprzez element wykonawczy (pierścienie piezoelektryczne) na intensywne drgania mechaniczne. Odpowiedni kształt bloku wykonawczego oraz stalowy blok reaktancyjny zapewniają na wyjściu

z przetwornika maksymalną amplitudę, która w zależności od liczby pierścieni może mieć wartość od kilku do kilkunastu mikrometrów. W omawianym stanowisku badawczym wykorzystano przetwornik piezoelektryczny zgodny z modelem Branson 502/932R o oznaczeniu producenta MPI-5020S-6PS, wyposażony w sześć pierścieni piezoelektrycznych, w którym blok reaktancyjny jest wykonany ze stali nierdzewnej typu 304, a blok wykonawczy – ze stopu tytanu Ti6Al4V [4–6].

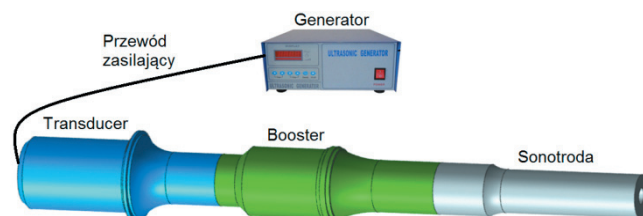
- Wzmacniacz (booster, konwerter pierwszego stopnia) – opcjonalny modyfikator fali drgającej, który wzmacnia bądź redukuje wartość amplitudy drgań o stały współczynnik i przeważnie stanowi element mocujący. Na stanowisku pomiarowym korzystano z boostera o współczynniku wzmocnienia 1:1,5 [4, 6].

- Sonotroda (konwerter drugiego stopnia) – element wykonawczy będący w kontakcie z materiałem obrabianym, który przekazuje mu energię drgań. Sonotroda powinna mieć charakterystykę falową, której postać odpowiada drganiom fali wzdłużnej falowodu. Natomiast częstotliwość rezonansowa drgań powinna być możliwie zbliżona do częstotliwości rezonansowej układu przetwornik–wzmacniacz. Projekt sonotrody musi również przewidywać, że pożądana postać drgań powinna być możliwie niskim modem fali, dzięki czemu sonotroda będzie mogła pracować przy mniejszej energii wprowadzonej do układu. W celu określenia częstotliwości rezonansowej elementu wykonawczego należy przeprowadzić analizę modalną przewidywanego kształtu z wykorzystaniem metody elementów skończonych [4, 6].

Elementy falowodu, pomimo starannego wykonania, odbiegają nieznacznie charakterystyką nominalną od charakterystyki rzeczywistej. Jest to spowodowane niejednorodną strukturą materiałową lub nierównomiernym rozmieszczeniem masy w falowodzie. Dlatego, aby przygotować układ wzbudzający drgania, konieczne jest dostrojenie parametrów pracy generatora ultradźwiękowego do prawidłowej współpracy z określonym falowodem [4].

Istotną kwestią jest również materiał, z jakiego wykonane są poszczególne elementy układu generującego drgania ultradźwiękowe. Materiały konstrukcyjne stosowane do budowy falowodu powinny się charakteryzować dużą wytrzymałością mechaniczną, możliwie niską impedancją akustyczną oraz niską gęstością [4, 6].

Jako materiał do wykonania wzmacniacza wybrano stop tytanu Ti6Al4V ze względu na niską impedancję akustyczną tego materiału oraz jego dużą wytrzymałość. Sonotrody wykonano z aluminium 7075, wykazującego najlepszy stosunek wartości impedancji akustycznej i obrabialności w porównaniu z pozostałymi materiałami [4].



Rys. 2. Układ wzbudzający drgania ultradźwiękowe wspomagające proces szlifowania [4]

Układ do pomiaru sił

Do pomiaru sił skrawania występujących w procesie szlifowania wspomaganego drganiami ultradźwiękowymi wykorzystano siłomierz zbudowany na bazie czterech czujników piezoelektrycznych typu 9601A3110000 firmy Kistler. Przetworniki piezoelektryczne, przetwarzające

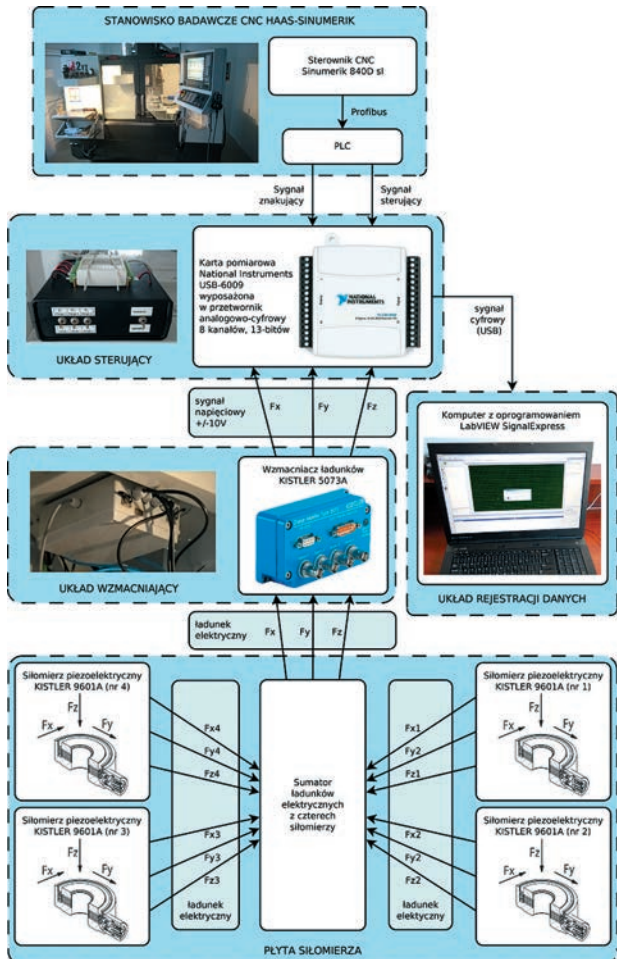
oddziałujące na nie siły na proporcjonalne do ich wartości napięcie elektryczne, pozwalają na pomiar sił skrawania w trzech prostopadłych do siebie osiach: X, Y i Z [7].

Użycie czterech czujników wymusiło zastosowanie sumatora ładunków elektrycznych w celu otrzymania z dwunastu sygnałów wejściowych po jednym sygnale na wyjściu na każdą oś [4]. Trzy sygnały wyjściowe z sumatora przekazywano do przemysłowego wzmacniacza ładunków elektrycznych typu 5073A311, przekształcającego sygnały z czujników piezoelektrycznych do standardu przemysłowego $\pm 10\text{ V}$ o proporcjonalnej wartości [7]. Następnie sygnały od sił w osiach X, Y i Z były przekazywane do karty pomiarowej model USB6009 firmy National Instruments i zapisywane za pomocą oprogramowania LabVIEW SignalExpress.

Po opracowaniu całego układu i przed realizacją właściwych badań wskazania wartości mierzonych siłomierza zostały wyzorcowane. Proces ten został wykonany za pomocą wzorcowanego dynamometru kabłąkowego [4]. Opisany układ do pomiaru sił przedstawiono na rys. 3.

Aby usprawnić pomiary przy ich bardzo dużej liczbie, został zaprojektowany i wykonany układ sterujący pomiarami sił szlifowania z poziomu programu technologicznego. Na potrzeby tego rozwiązania wprowadzono dodatkowe dwa sygnały ze sterownika PLC, sterowane funkcjami pomocniczymi M:

- M91 – włączenie pierwszego sygnału – rozpoczęcie przejścia obróbkowego,
- M92 – wyłączenie pierwszego sygnału – zakończenie przejścia obróbkowego,
- M93 – włączenie drugiego sygnału – znak 1 w numeracji przejść obróbkowych,



Rys. 3. Schemat blokowy układu do pomiaru sił w procesie szlifowania [4]

- M94 – wyłączenie drugiego sygnału – znak 0 w numeracji przejść obróbkowych.

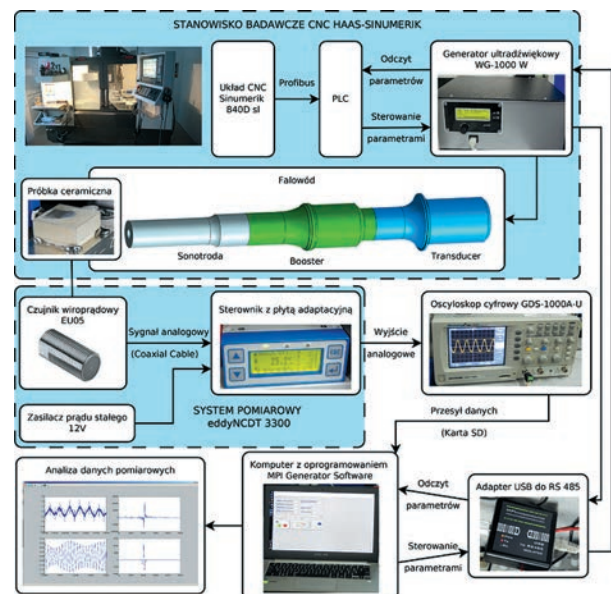
Pierwszy sygnał służył do automatycznego przełączenia siłomierza z trybu czuwania w tryb pomiaru, a tym samym do określania przedziałów, w których występowało usuwanie materiału. Było to możliwe, ponieważ funkcje M startu i końca pomiaru były umieszczane w programie tuż przed przejściami obróbkowymi i zaraz po nich. Rozwiązanie to pozwala na dokładniejszą analizę wyników ze względu na wyraźne zaznaczenie, które zakresy zarejestrowanych sygnałów przebiegu siły szlifowania mają zostać rozważone. Umożliwiło to także zautomatyzowanie procesu obróbki danych za pomocą odpowiednio napisanego algorytmu komputerowego.

Drugi sygnał wykorzystano natomiast do numeracji kolejnych przejść obróbkowych, które wykonywano z różnymi parametrami technologicznymi. Każdemu przejściu obróbkowemu przypisywano liczbę binarną zapisaną za pomocą 8 bitów na wykresie rejestrowanych sił skrawania ($0 - 0\text{ V}$, $1 - 5\text{ V}$), co pozwalało na dokładne powiązanie zmierzonego przebiegu sił z parametrami obróbki, przy jakich został zarejestrowany, ponieważ każdej liczbie odpowiadały parametry nastawne procesu zapisane pod postacią ujednoliconego numeru.

Układ do pomiaru amplitudy drgań

Do realizacji badań konieczna jest znajomość amplitudy i częstotliwości drgań przedmiotu obrabianego osadzonego w falowodzie dla sonotrody wykorzystywanej w danym planie badawczym. Z myślą o pomiarach tych wartości opracowano układ przedstawiony na rys. 4.

Układ ten oparto na czujniku wiroprowadowym z aktywną kompensacją temperatury EU05 firmy Micro-Epsilon i sterowniku z płytą adaptacyjną przeznaczoną do tego czujnika. Elementy te razem tworzą bezstykowy system pomiarowy przemieszczeń eddyNCDT 3300 tej samej firmy, pozwalający mierzyć przemieszczenia w zakresie $0,5\text{ mm}$ z dokładnością do $1\text{ }\mu\text{m}$. Kolejnym elementem był oscyloskop cyfrowy GDS-1000A-U firmy GW Instek, służący do rejestracji sygnału analogowego ze sterownika systemu eddyNCDT 3300, zapisujący te dane do pliku o formacie CSV na kartę pamięci SD. Dane te są później przetwarzane w celu określenia pożądaných wielkości.



Rys. 4. Schemat blokowy układu do pomiaru amplitudy drgań ultradźwiękowych [4]

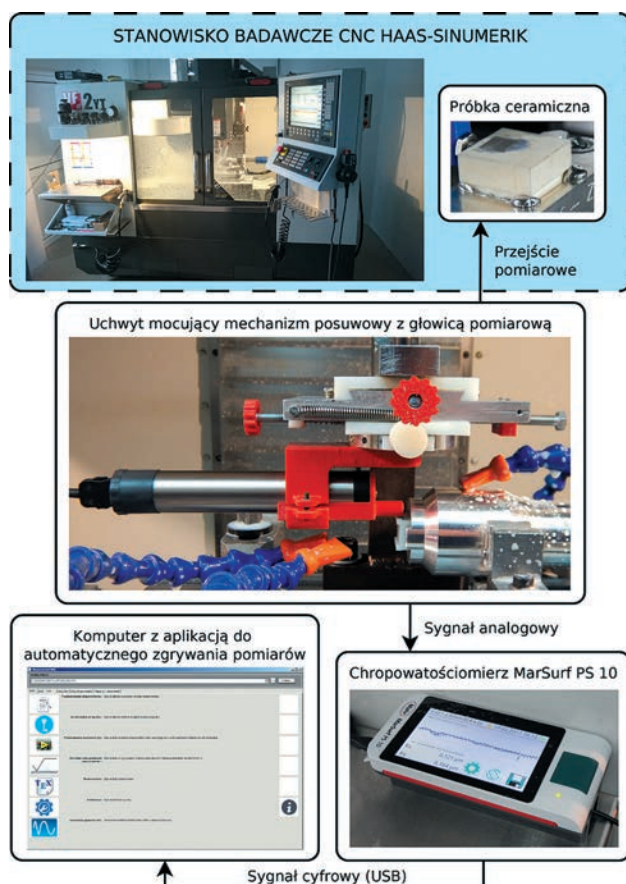
Surowy sygnał jest filtrowany filtrem pasmowoprzepustowym o częstotliwości $\pm 10\%$ z 20 kHz, aby określić amplitudę drgań. Aby ustalić ich częstotliwość, wykonuje się dodatkowo szybką transformatę Fouriera z sygnału odfiltrowanego [4].

Układ do pomiaru chropowatości powierzchni

W badaniach chropowatości powierzchni wykorzystano metody liniowego mechanicznego pomiaru stykowego. Początkowo podstawą układu pomiarowego był profilometr Surtronic 3+ firmy Taylor-Hobson z oprogramowaniem TalyProfile Lite [4]. Jednak – ze względu na czasochłonność ręcznego zapisywania, przetwarzania i analizowania pomiarów z poziomu dostarczanego przez producenta oprogramowania – na etapie modyfikacji stanowiska wypracowano inne podejście. Do pomiarów chropowatości powierzchni użyto profilometru MarSurf PS 10 oraz własnej aplikacji automatyzującej proces zarządzania zapisywaniem, nazywaniem, przetwarzaniem i analizowaniem zarejestrowanych profili oraz wartości parametrów chropowatości (rys. 5).

Dodatkowo opracowano specjalny czteroosiowy uchwyt mocujący mechanizm posuwowy, pozwalający na odpowiednie ustawienie mechanizmu w przestrzeni obróbkowej maszyny. Tym samym umożliwia on pomiar chropowatości (zarówno dla szlifowania czółowego, jak i obwodowego) w kierunku równoległym i prostopadłym do posuwu oraz zapewnia powtarzalność pozycjonowania sondy pomiarowej względem obrobionej powierzchni.

Skutkuje to skróceniem czasu potrzebnego na poprawne ustawienie sondy względem mierzonej powierzchni po każdym przejściu obróbkowym ściernicy. Jednocześnie pozwala na zwiększenie liczby powtórzeń pomiarowych profilu.



Rys. 5. Schemat blokowy układu do pomiaru chropowatości powierzchni

Miało to ogromny wpływ na czas realizacji całego planu badawczego, ponieważ pomiary były wykonywane każdorazowo po zmianie parametrów technologicznych i nowym przejściu obróbkowym ściernicy. Po każdym przejściu obróbkowym mierzono kilkakrotnie chropowatość powierzchni w kierunku równoległym i prostopadłym do posuwu. Każdy zarejestrowany profil kodowano za pomocą ujednoczonego numeru, dzięki czemu możliwe było późniejsze zidentyfikowanie, przy jakich parametrach nastawnych procesu został zmierzony dany profil.

Podsumowanie

W wyniku przeprowadzenia wszystkich modyfikacji obrabiarki bazowej powstało unikatowe czteroosiowe stanowisko diagnostyczne do badań procesów szlifowania konwencjonalnego oraz ze wspomaganie obróbki oscylacjami przedmiotu obrabianego. Stanowisko umożliwia realizację rozbudowanych planów badawczych, a jedyne czynności obsługowe to rozpoczęcie pomiaru w LabVIEW SignalExpress oraz mocowanie do stołu obrabiarki uchwytu z mechanizmem posuwowym po każdym przejściu pomiarowym, w trakcie przerwy programu, i uruchamianie pomiarów chropowatości. Czynności związane z akwizycją, zgrywaniem, zapisywaniem, nazywaniem i przetwarzaniem danych pomiarowych leżą po stronie autorskiej aplikacji, napisanej na potrzeby tego stanowiska.

Do dalszej automatyzacji stanowiska badawczego konieczne jest wprowadzenie rozwiązań obejmujących:

- Wykorzystanie oprogramowania LabVIEW do automatycznego tworzenia, nazywania i zapisywania plików TDMS z pojedynczych przejść pomiarowych, co pozwoli na zmniejszenie rozmiaru zapisanych plików i skrócenie czasu potrzebnego na ich przetwarzanie. Przełoży się to na możliwość wykonywania w jednym podejściu i przechowywania danych z większej liczby przejść pomiarowych.
- Zastosowanie chropowatościomierza z bezprzewodowym mechanizmem posuwowym zamocowanym w oprawce narzędziowej, co umożliwi automatyczne pozycjonowanie głowicy pomiarowej i rozpoczynanie pomiarów chropowatości (dodatkowy sygnał wyprowadzony z PLC) z poziomu programu technologicznego.

Publikacja powstała na podstawie wyników projektu „Technologia wysokowydajnej obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym przedmiotów ceramicznych o złożonej geometrii”, realizowanego w ramach Programu Badań Stosowanych Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (PBS2/B6/17/2013).

LITERATURA

1. Wang Y., Lin B., Wang S., Cao X. “Study on the system matching of ultrasonic vibration assisted grinding for hard and brittle materials processing”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 77 (2014): s. 66–73.
2. Porzycki J., Habrat W., Krok M., Żółkoś M., Sałata M. “Wpływ drgań ultradźwiękowych na siłę i chropowatość powierzchni w procesie szlifowania stopu tytanu Ti6Al4V”. *Mechanik*. 90, 8–9 (2017): s. 769–771.
3. Wang Y., Lin B., Cao X., Wang S. “An experimental investigation of system matching in ultrasonic vibration assisted grinding for titanium”. *Journal of Materials Processing Technology*. 214, 9 (2014): s. 1871–1878.
4. <http://ktwia.prz.edu.pl/projekt-badawczy-pbs2b6172013/> (dostęp: 14.03.2018 r.).
5. <http://www.mpi-ultrasonics.com/> (dostęp: 14.03.2018 r.).
6. Krok M., Porzycki J., Żółkoś M. „Wybrane zagadnienia projektowania sonotrod na potrzeby obróbki ubytkowej wspomaganie drganiami ultradźwiękowymi obrabianego przedmiotu”. *Mechanik*. 89, 10 (2016): s. 1354–1355.
7. <https://www.kistler.com/en/> (dostęp: 14.03.2018 r.).