

Otrzymano: 01 marca 2018 / Zaakceptowano: 20 kwietnia 2018 / Zamieszczono na WWW: 20 grudnia 2018

*obrabiarka ciężka,
sztywność statyczna,
warunki przemysłowe*

Janusz ŚLIWKA^{1*}

PROCEDURA BADAŃ SZTYWNOŚCI STATYCZNEJ OBRABIAREK CIĘŻKICH

W artykule przedstawiono specyficzne problemy związane z pomiarami sztywności statycznej obrabiarek ciężkich przeprowadzanymi w warunkach przemysłowych. Omówiono stosowane metody badawcze. Na podstawie zebranych doświadczeń w tego typu badaniach zaproponowano procedurę obejmującą metodykę pomiarów sztywności statycznej obrabiarek ciężkich.

1. WPROWADZENIE

Sztywność statyczna obrabiarek skrawających do metali jest cechą konstrukcyjną, która zawsze należała do najistotniejszych z punktu widzenia prawidłowego działania tego typu maszyn. Ma ona decydujący wpływ na dokładność wymiarowo-kształtową wykonywanych na obrabiarkach przedmiotów, dlatego też jest tematyką wielu publikacji. Cecha ta jest uwzględniana przez konstruktorów i analizowana przez badaczy zarówno w odniesieniu do całego układu nośnego obrabiarki (sztywność globalna) [1–23], jak i w odniesieniu do jego ważniejszych elementów składowych, takich jak wrzeciono czy prowadnice (sztywność lokalna) [24–26]. Pierwsze prace dotyczące sztywności statycznej obrabiarek pochodzą z lat trzydziestych ubiegłego wieku. Zostały one zapoczątkowane w Niemczech przez Kiekerbusha, a w ZSRR przez Rieszetowa. W okresie po II wojnie światowej opracowane zostały również w ZSRR pierwsze normy dotyczące sztywności [27]. Normy te posłużyły jako wzorzec dla polskich opracowań normalizacyjnych [28]. W późniejszych latach problem sztywności statycznej, od strony zarówno obliczeniowej, jak i pomiarowej, analizowany był w wielu ośrodkach badawczych. Na wyróżnienie zasługują tutaj prace zespołów Rieszetowa i Wecka [29–32]. Wraz z szybkim rozwojem metod numerycznych, zainteresowanie większości badaczy coraz bardziej skupia się na analitycznych metodach wyznaczania sztywności a często pomijane są ważkie z punktu widzenia weryfikacji modeli numerycznych problemy pomiarów przeprowadzanych na obiektach rzeczywistych.

¹ Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn, Gliwice,

* E-mail: janusz.sliwka@polsl.pl

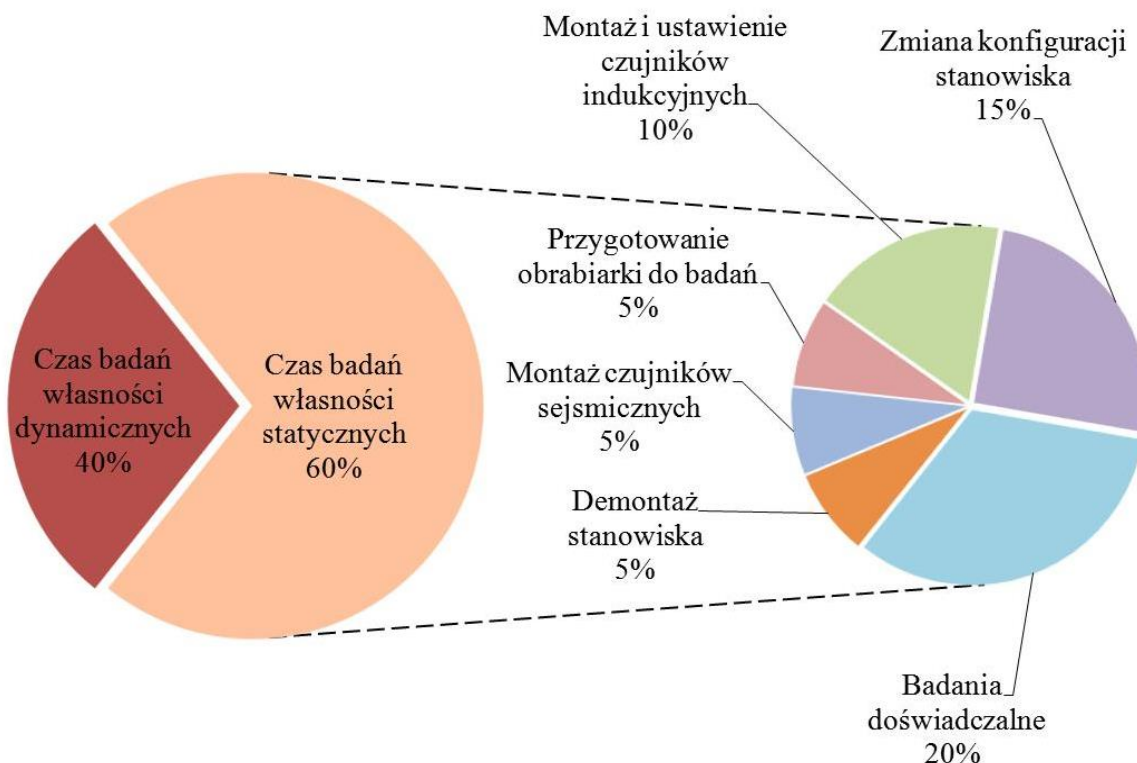
2. WARUNKI PRZEMYSŁOWE

Określenie właściwości statycznych obrabiarek nowo produkowanych odbywa się zazwyczaj na zakończenie procesu produkcji. Działania takie mają sens w przypadku produkcji seryjnej, gdyż stanowią dobry sposób kontroli poprawności procesu produkcyjnego. W przypadku produkcji jednostkowej oraz w przypadku obrabiarek wyprodukowanych dawniej zachodzi konieczność przeprowadzania badań właściwości eksploatacyjnych tych maszyn w warunkach przemysłowych. Specyfika badań obrabiarek prowadzonych w takich warunkach determinowana jest co najmniej trzema istotnymi faktami. Po pierwsze, przeprowadzenie badań wymaga wyłączenia z produkcji badanej obrabiarki, co zazwyczaj łączy się z bardzo dużymi kosztami. Dlatego też badane obrabiarki udostępniane są zazwyczaj na nie dłużej jak na jedną zmianę roboczą. Po drugie, badania odbywają się na hali produkcyjnej najczęściej bez zatrzymania produkcji na sąsiednich maszynach. Powoduje to konieczność uwzględniania w planach badań istnienia znacznych niekiedy zakłóceń w postaci drgań przenoszonych z zewnątrz oraz zakłóceń elektromagnetycznych. Po trzecie, brak jest jednoznacznych unormowań dotyczących tego typu badań.

O warunkach przemysłowych przeprowadzania badań obrabiarek można mówić wtedy, kiedy spełniona będzie jedna z następujących przesłanek:

1. Badania przeprowadzane będą w zmiennych warunkach otoczenia, takich jak: temperatura, hałas, drgania, zapylenie. Źródłem zakłóceń mających największy wpływ na wyniki badań obrabiarek są zazwyczaj drgania generowane przez pracujące w bezpośrednim sąsiedztwie badanego obiektu maszyny, a w szczególności przez przejeżdżające ciężkie suwnice. Podczas badań sztywności statycznej ciężkiej tokarki karuzelowej, opisanych w [33], stwierdzano oscylacje wskazań zegarowych czujników przemieszczeń o działce elementarnej 0,001 mm wokół położenia zerowego w zakresie $\pm 0,015$ mm. Drgania spowodowane były głównie przejeżdżającymi obok badanej obrabiarki suwnicami.
2. Ograniczony będzie czas przeprowadzania testów eksperymentalnych. Z doświadczeń autora wynika, że najczęściej mamy do czynienia z badaniami trwającymi jedną zmianę roboczą, tj. osiem godzin. Niezależnie od tego, czy badania odbywają się u producenta czy użytkownika obrabiarki, najważniejszym czynnikiem determinującym zakres pomiarów jest czas dostępu do badanego obiektu. W przypadku badań przeprowadzanych u producenta są one ostatnim etapem procesu produkcyjnego (pomijając transport maszyny do użytkownika), w którym kumulują się opóźnienia z wszystkich pozostałych etapów. Dlatego też margines czasowy pozostawiony na badania odbiorcze zazwyczaj jest znacząco uszczuplany. Konsekwencją tego jest przeprowadzanie tylko niezbędnych, wymaganych badań odbiorczych, takich jak pomiary dokładności geometrycznej i rezygnacja z wszelkich dodatkowych, niewymaganych przez odbiorcę, badań, do których należą między innymi pomiary sztywności statycznej. Badania przeprowadzane u użytkownika wymagają wyłączenia badanej obrabiarki z procesu produkcji, co wiąże się ze znacznymi kosztami. Dodatkowo użytkownik maszyny bardzo rzadko zainteresowany jest wynikami tego typu badań, co wynika z faktu, że badania sztywności

statycznej w głównej mierze są wykorzystywane przy reprodukcji i zazwyczaj nie mogą wpłynąć bezpośrednio na polepszenie właściwości eksploatowanej już obrabiarki. Na podstawie [33] można szacować udział procentowy czasów przeznaczonych na poszczególne etapy badań przeprowadzanych w warunkach przemysłowych. Taki szacunkowy udział przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Szacunkowy podział czasu przeznaczanego na badania obrabiarki w warunkach przemysłowych [33]

Fig. 1. Estimated time sharing dedicated to studies of machine tools in operating environment [33]

W przypadku przeprowadzania pełnych badań sztywnościowych obrabiarki zakres koniecznych do realizacji pomiarów jest bardzo szeroki. Wynika to, w głównej mierze, z dużej liczby różnych konfiguracji zespołów roboczych maszyny. Przykładowo, dla tokarskiego centrum karuzelowego z przesuwną belką suportową konieczne jest przeprowadzenie około 216 cykli pomiarów ($3 \times 2 \times 2 \times 3 \times 2 \times 3$), przy 72 ($3 \times 2 \times 2 \times 3 \times 2$) różnych konfiguracjach. Liczba ta wynika z następujących uwarunkowań konfiguracyjnych zespołu roboczego tej obrabiarki:

- 3 wysuwu suwaków,
- 2 położenia suportów na belce suportowej,
- 2 suwaki (tokarski i frezarski),
- 3 kierunki wyznaczania sztywności (X, Y, Z),
- 2 położenia belki suportowej (górne i dolne).

Dodatkowo w celu uniknięcia błędów grubych konieczne jest trzykrotne powtórzenie pomiarów. Zakładając, że dla jednej konfiguracji mierzone są przemieszczenia tylko

w czterech punktach (na imaku, suwaku, suporcie i stojaku) oraz czas montażu jednego czujnika przemieszczeń wynosi od 15 do 60 minut [33], otrzymuje się czas potrzebny na montaż i zerowanie czujników na poziome od 72 do 288 godzin. Otrzymaną liczbę godzin przeznaczonych na montaż czujników można zmniejszyć, zakładając, że w około 50% przypadków zmiana konfiguracji obrabiarki nie wymaga zmiany położenia czujnika. Tak więc ostateczny czas konieczny do montażu i zerowania czujników przemieszczeń wynosi od 36 do 144 godzin. Dodatkowo do tej wartości należy doliczyć czas potrzebny na zmianę konfiguracji (ok. 15% czasu pełnych badań wg [33]) oraz czas przeprowadzania samych pomiarów (20% czasu pełnych badań). Ostatecznie otrzymujemy całkowity czas badań od 48 do około 194 godzin, co daje od 6 do 24 zmian roboczych. Wyłączenie obrabiarki na tak długi czas w większości przypadków jest nie do zaakceptowania zarówno przez ostatecznego użytkownika, jak i przez jej producenta.

3. Badany obiekt będzie niekompletny lub nie będzie całkowicie zmontowany. Z przyczyn technologicznych (np. zastosowanie korpusu wypełnianego betonem) obrabiarki bardzo często montowane są „na gotowo” dopiero u ostatecznego użytkownika. Dlatego podczas badań odbiorczych przeprowadzanych u producenta mamy do czynienia z nie w pełni zmontowanymi maszynami. Konsekwencją tego może być brak możliwości określenia ostatecznych właściwości badanej obrabiarki.

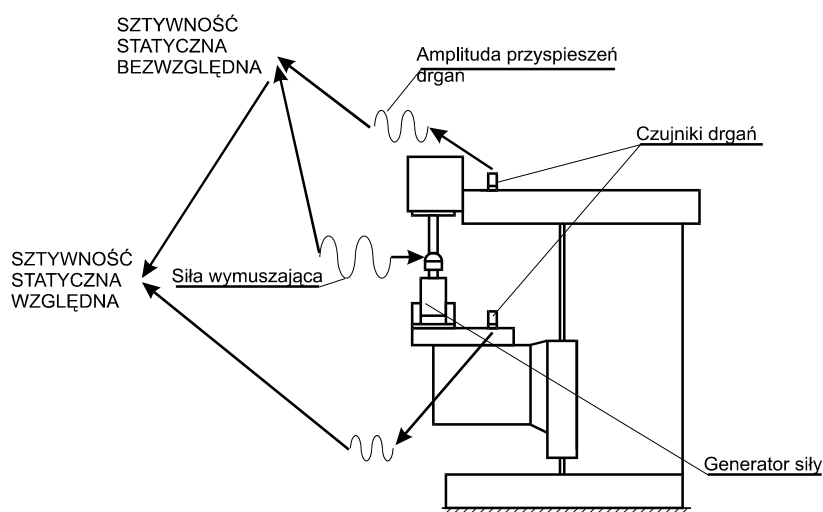
3. ZASTOSOWANE METODY BADAWCZE

Najczęściej stosowane metody badania sztywności statycznej polegają na obciążeniu obrabiarki siłami imitującymi siły skrawania oraz pomiarze przemieszczeń elementów maszyny w określonych punktach, w kierunkach działania obciążenia. Obciążenia wywierane są siłownikami hydraulicznymi, wzbudnikami elektrycznymi lub poprzez zawieszanie ciężarów. W praktyce najczęściej stosuje się siłowniki hydrauliczne. Pomiarzy sztywności statycznej zostały usystematyzowane w normach branżowych, np. [28].

Poszczególne metody pomiarów sztywności różnią się między sobą głównie sposobem realizacji pomiaru przemieszczeń. Można tu wyróżnić dwie grupy metod: metody oparte na pomiarze tradycyjnymi czujnikami dotykowymi lub bezdotykowymi oraz metody wykorzystujące inne sposoby pomiaru przemieszczeń. Poprzez tradycyjne czujniki przemieszczeń rozumie się tutaj czujniki zazwyczaj stosowane do pomiaru przemieszczeń podczas badań odbiorczych obrabiarek.

Zaproponowana w dalszej części artykułu metodyka wykorzystuje opracowaną w Katedrze Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej metodę wyznaczania sztywności statycznej obrabiarek (metodę DWSS) [23]. Metoda wyznaczania sztywności statycznej z wykorzystaniem sygnału dynamicznie zmiennego bazuje na równości przemieszczenia (wybranego zespołu obrabiarki) wywołanego siłą statyczną z amplitudą przemieszczenia (tego samego zespołu) wywołanego zmienną siłą dynamiczną, o amplitudzie równej wartości siły statycznej (schemat ideowy pokazano na rys. 2). Takie zjawisko występuje, jeżeli częstotliwość siły wymuszającej jest znacznie niższa od najniższej częstotliwości drgań własnych rozpatrywanego obiektu.

Metoda DWSS polega na pomiarze drgań wymuszonych siłą harmoniczną o odpowiednio niskiej częstotliwości. Wartość wskaźników sztywności statycznej wyznacza się jako iloraz wartości amplitudy siły obciążającej i wartości amplitudy przemieszczenia. Amplitudy przemieszczenia wyznacza się na podstawie amplitudy przyspieszenia drgań mierzonych za pomocą czujników sejsmicznych. Zastosowanie czujników sejsmicznych, mocowanych na korpusie obrabiarki za pomocą magnesów trwałych, jest jedną z głównych zalet tej metody w porównaniu do metod konwencjonalnych. Eliminuje to konieczność budowania układów odniesienia dla czujników przemieszczeń co jest szczególnie uciążliwe w przypadku obrabiarek wielkogabarytowych podczas badań przeprowadzanych w warunkach przemysłowych.



Rys. 2. Schemat ideowy metody dynamicznej DWSS [23]
 Fig. 2. Block diagram presenting dynamic method DDSS [23]

4. METODYKA POMIARÓW

Prezentowana w artykule metodyka badania obrabiarek po raz pierwszy została zaproponowana w [33]. Powstała ona w wyniku doświadczeń zebranych podczas badań kilkunastu obrabiarek ciężkich, przeprowadzonych w Katedrze Budowy Maszyn. Wyniki tych badań szeroko publikowane były między innymi w pracach [1–22] oraz skutkowały kilkunastoma niepublikowanymi raportami z badań. Proponowana metodyka badania obrabiarek ciężkich w warunkach przemysłowych jest zbiorem wytycznych i zaleceń, tworzących jako całość tok postępowania podczas badań. Powstała ona na podstawie badań przeprowadzonych na tokarskich karuzelowych centrach obróbczych, czyli obrabiarkach zbudowanych w układzie bramowym. Dlatego też jej stosowanie do obrabiarek o odmiennym UNO (Układzie Nośnym Obrabiarki) może być w różnym stopniu ograniczone. W praktyce metodyka badania obrabiarek ciężkich stosowana była również do pomiarów sztywności statycznej frezarek bramowych [18] (układ bramowy), a wybrane aspekty metodologii z powodzeniem zastosowane były również podczas badań innego typu obrabiarek, takich jak: ciężka tokarka typu TV [7, 21], frezarka do wykorbień [14, 19] oraz

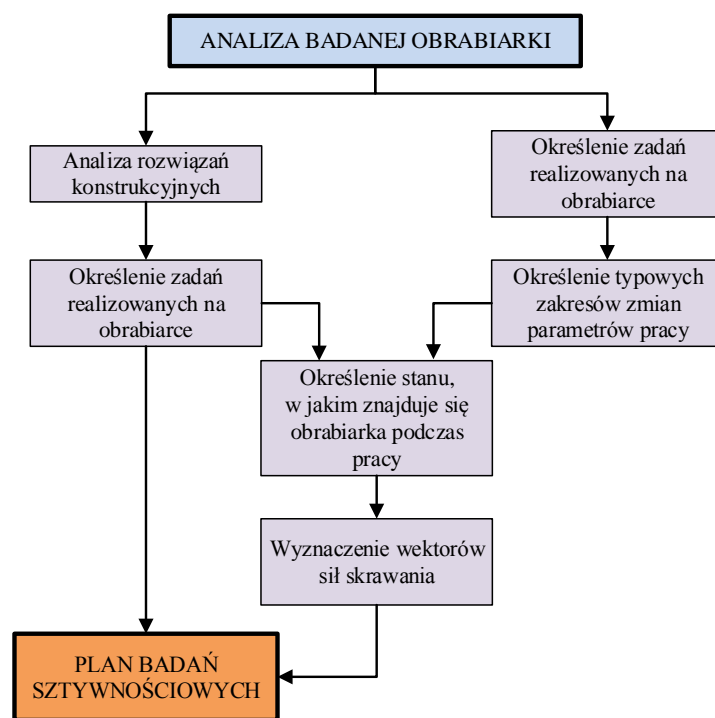
obrabiarki dla przemysłu kolejowego (przykładowo tokarka kołowa dwusuportowa UBF 112 N [1]).

Metodyka obejmuje czynności związane z przygotowaniem badań doświadczalnych, ich wykonaniem i analizą otrzymanych wyników. Proponowana procedura zawiera cztery etapy:

Etap 1 – analiza badanej obrabiarki, Etap 2 – opracowanie planu badań, Etap 3 – przeprowadzenie badań doświadczalnych, Etap 4 – opracowanie i analiza wyników badań.

Z punktu widzenia niniejszego artykułu istotne są pierwsze dwa etapy i one zostaną tutaj opisane. Kolejne etapy (trzeci i czwarty) są naturalną konsekwencją ustaleń poczynionych na etapach pierwszym i drugim. Dokładny opis metodyki wyznaczania sztywności stycznej obrabiarek ciężkich w warunkach przemysłowych można znaleźć w pracy [33].

Czynności wchodzące w skład analizy badanej obrabiarki poglądowo przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Czynności wchodzące w skład analizy badanej obrabiarki [33]

Fig. 3. Activities included in the analysis of the investigated machine tool [33]

ETAP 1

1. Analiza rozwiązania konstrukcyjnego

Celem analizy rozwiązania konstrukcyjnego jest określenie najcięższych warunków pracy obrabiarki ze względu na jej konstrukcję (czyli takich warunków pracy, które powodują najbardziej niekorzystny stan obciążenia). Ustalone zostają wzajemne konfiguracje zespołów roboczych, przy których należy spodziewać się maksymalnych przemieszczeń pomiędzy powierzchniami ustalającymi narzędzie a ustalającymi przedmiot obrabiany.

2. Analiza funkcjonalna (określenie zadań realizowanych na obrabiarce)

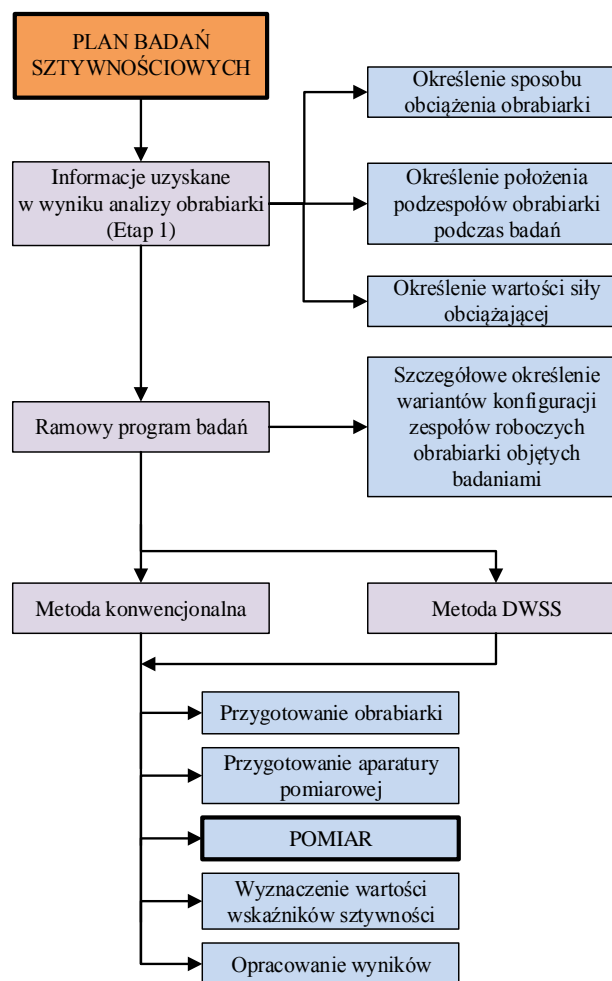
Ustalone zostaje przeznaczenie obrabiarki oraz jej możliwości techniczne. Określa się typowe oraz graniczne parametry skrawania, tj. prędkość skrawania, prędkość obrotową wrzecion narzędziowych (frezarskich) lub wrzecion przedmiotowych (tokarskich), posuw i głębokość skrawania. Na podstawie tych informacji określa się wartości, kierunki działania, zwroty i punkty zaczepienia składowych sił skrawania.

ETAP 2

Plan badań metodą konwencjonalną obejmuje:

- a) wyznaczenie sztywności suwaka (suwaków),
- b) wyznaczenie sztywności suportu (suportów).

Badaną obrabiarkę obciąża się zgodnie z zaleceniami uzyskanymi na pierwszym etapie. Pomiary należy przeprowadzić dla dwóch kierunków działania składowej siły skrawania obciążającej obrabiarkę (w kierunku osi X i w kierunku osi Y) i przy dwóch skrajnych (minimalnym i maksymalnym) wysuwach suwaków. Do rejestracji przemieszczeń należy stosować indukcyjne czujniki przemieszczeń, bazowane na stole, suporcie, belce suportowej lub niezależnym od UNO obrabiarki rusztowaniu.



Rys. 4. Etapy planu badań sztywności statycznej [33]

Fig. 4. Stages of static stiffness investigation [33]

Plan badań metodą DWSS obejmuje wyznaczanie sztywności tych samych elementów jak w przypadku metody konwencjonalnej. Obrabiarka obciążana jest siłą harmoniczną o amplitudzie równej co do wartości składowym siły skrawania. Badania prowadzone są dla kierunków działania siły oraz wysuwów suwaków analogicznych do przypadku badań metodą konwencjonalną, dla częstotliwości siły wymuszającej 3, 5 i 7 Hz. Do rejestracji używane są sejsmiczne czujniki drgań, mocowane bezpośrednio na badanych elementach obrabiarki za pomocą magnesów stałych.

Plan badań sztywności statycznej obejmuje swoim zakresem etapy przedstawione na rys. 4 i bazuje na informacjach dotyczących sposobu obciążenia obrabiarki, położenia zespołów roboczych oraz wartości maksymalnych sił skrawania.

5. PODSUMOWANIE

W niniejszym opracowaniu zdefiniowano warunki przemysłowe przeprowadzania pomiarów obrabiarek, skrótkowo omówiono metodę wyznaczania sztywności statycznej z wykorzystaniem sygnału dynamicznie zmiennego (DWSS), a następnie zaproponowano procedurę wyznaczania sztywności statycznej obrabiarek ciężkich w warunkach przemysłowych. Procedura ta, nie tylko powstała na bazie doświadczeń zgromadzonych podczas pomiarów sztywności statycznej różnego rodzaju obrabiarek prowadzonych w Katedrze Budowy Maszyn w ciągu kilkunastu lat, ale również została sprawdzona w praktyce podczas nowo prowadzonych tego typu badaniach. Zaproponowana w niej metodyka pomiaru sztywności statycznej obrabiarek ciężkich gwarantuje uzyskanie wiarygodnych wyników badań przeprowadzanych w warunkach przemysłowych a czas pomiarów dla jednej obrabiarki nie przekracza 8 godzin.

LITERATURA

- [1] KAZMIERCZAK M., ŚLIWKA J., KOSMOL J., 2007, *Static Stiffness Analysis of the Carrying Framework of Special Machine Tools UBF-112N*, 11th International Research/Expert Conference, Trends in the Development of Machinery and Associated Technologies, TMT 2007, Hammamet, Tunisia, 175–178.
- [2] KAZMIERCZAK M., ŚLIWKA J., KOSMOL J., 2008, *A static stiffness analysis of a heavy vertical lathe*, 12th International Research/Expert Conference, Trends in the Development of Machinery and Associated Technologies, TMT 2008, Istanbul, Turkey, 1261–1264.
- [3] KAZMIERCZAK M., ŚLIWKA J., 2002, *A comparison of vertical lathe centres of KCI type with regard to their static stiffness*, The 13th International DAAAM Symposium, Intelligent Manufacturing & Automation: Learning from Nature, October.
- [4] KAZMIERCZAK M., ŚLIWKA J., 2006, *Analiza sztywności statycznej układu nośnego tokarek specjalnych UBF-112N*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 2, 181–200.
- [5] KAZMIERCZAK M., ŚLIWKA J., 2007, *Analiza sztywności statycznej prototypu tokarki karuzelowej KDC 700/800 NC*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 1, 213–232.
- [6] KLARECKI K., ŚLIWKA J., KOSMOL J., 2000, *Badania eksperymentalne i modelowe tokarki kołowej UBE 150/2N*, IV Forum Prac Badawczych – Kształowanie części maszyn przez usuwanie materiału, Mielno-Unieście.
- [7] ŚLIWKA J., KAZMIERCZAK M., KOSMOL J., 2007, *Static Stiffness Research of Large-Size Machine Tools Based on the Example of TV 240 CNC Machine Tool*, 11th International Research/Expert Conference, Trends in the Development of Machinery and Associated Technologies, TMT, Tunisia, 179–182.

- [8] SŁIWKA J., KAŻMIERCZAK M., KOSMOL J., 2005, *Badania sztywności statycznej frezarki HSM 180*, Inżynieria Maszyn, 10/4, 30–42.
- [9] SŁIWKA J., KOSMOL J., KAŻMIERCZAK M., 2005, *The Research Concerning Static Properties of the Planer Mill for High-Speed Machining*, 9th International Conference MTM 2005, Turkey, 737–740.
- [10] SŁIWKA J., KOSMOL J., KAŻMIERCZAK M., 2005, *Identyfikacja własności statycznych i dynamicznych obrabiarek ciężkich w warunkach przemysłowych*, Przegląd Mechaniczny, Warszawa, 5, 30–35.
- [11] SŁIWKA J., KOSMOL J., 2005, *Research of static stiffness of CNC machine tools*, 7th Int. Conference on Computer Integrated Manufacturing – CIM'2005, Gliwice-Wisła, 224–229.
- [12] SŁIWKA J., 2006, *Statical Stiffness of CNC Machine Tools*, 10TH International Research/Expert Conference, Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, TMT 2006, Spain.
- [13] SŁIWKA J., 2002, *A metod of determining the statical rigidity of heavy machine tools*, 6th International Research/Expert Conference, Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, TMT 2002, B&H, Sarajevo.
- [14] SŁIWKA J., KAŻMIERCZAK M., 2006, *Statical Stiffness Research of the Milling Machine Used for Cranking*, 10TH International Research/Expert Conference, Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, TMT, Spain.
- [15] SŁIWKA J., KOSMOL J., 2002, *Some problem of new method of determining machine tools' static stiffnes*, The 4th International Scientific Conference, Development of Metal Cutting DMC, Kosice.
- [16] SŁIWKA J.; KOSMOL J., KAŻMIERCZAK M., 2001, *Some New Results of Dynamic Method of Determining the Heavy Machine Tools Static Rigidity*, 12th International DAAAM Symposium, Intelligent Manufacturing & Automation, Focus on Precision Engineering, Jena, Germany.
- [17] ŚLIWKA J., KAŻMIERCZAK M., KOSMOL J., NIEDBAŁA M., 2003, *Research of Static Stiffness of Heavy Machine Tools Using Conventional and SSDD Method*, Proceedings of the 7th International Research/Expert Conference, Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, TMT 2003, Lloret de Mar (Spain), 317–320.
- [18] SŁIWKA J., KAŻMIERCZAK M., KOSMOL J., 2005, *Badania sztywności statycznej frezarek bramowych w warunkach przemysłowych*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, 1, Gliwice.
- [19] ŚLIWKA J., KAŻMIERCZAK M., KOSMOL J., 2005, *Badania własności statycznych frezarki do wykorbień*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, 1, Gliwice.
- [20] ŚLIWKA J., KAŻMIERCZAK M., 2010, *Comparative analysis of (DDSS) Dynamic and Conventional Method of Static Stiffness Determination*, Proceedings of the 14th International Research /Expert Conference, TMT, Mediterranean Cruise, 29–32.
- [21] ŚLIWKA J., KAŻMIERCZAK M., 2006, *Wyznaczanie sztywności statycznej obrabiarek wielkogabarytowych na przykładzie tokarki TV-240 CNC*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 2, 161–180.
- [22] ŚLIWKA J., KAŻMIERCZAK M., 2011, *Analiza porównawcza metod wyznaczania sztywności statycznej obrabiarek*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją, 15, Poznań.
- [23] ŚLIWKA J., 2000, *Wyznaczanie sztywności statycznej obrabiarek metodą wymuszenia dynamicznego*, Zeszyty Naukowe Katedry Budowy Maszyn, 2, Gliwice.
- [24] CHENA D., FANA J., ZHANG F., 2012, *Dynamic and static characteristics of a hydrostatic spindle for machine tools*, Journal of Manufacturing Systems, 31/1, 26–33.
- [25] GAGNOL V., THIEN-PHU L., RAY P., 2011, *Modal identification of spindle-tool unit in high-speed machining*, Mechanical Systems and Signal Processing, 25/7, 2388–2398.
- [26] JASTRZĘBSKI D., PAWEŁKO P., SZWENGIER G., 2010, *Modeling the Effect of Geometric Errors on the Static Characteristics of Guide Rail Systems*, Advances in Manufacturing Science and Technology, 34/4.
- [27] GOST 7035-54, *Stanki mettalorezuscije, Obscije uslovija k standartom na normy žeskosti*.
- [28] BN-67/M-1522-02, *Obrabiarki do metali, Pomiar sztywności statycznej tokarek kłowych, Warunki i sposób pomiaru* (oparta na normie IOS: ZN-63/MPC-25064).
- [29] WECK M., ECKSTEIN R., 1987, *An Examination Technique to Determine Static Weakpoints of Machine Tools*, Annals of CIRP, 36/1, 257–261.
- [30] WECK M., McKEOWN P., BONSE R., HERBST U., 1995, *Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 44/2, 589-598.
- [31] WECK M., 1985, *Werkzeugmaschinen, Bd.4 Messtechnische Untersuchung und Beurteilung*, DVI-Verlag, Dusseldorf.
- [32] WECK M., 1979, *Werkzeugmaschinen, Bd.2 Konstruktion und Berechnung*, DVI-Verlag, Dusseldorf.
- [33] ZEWELD S., 1990, *Ocena porównawcza struktury nośnej obrabiarek ciężkich*, Rozprawa doktorska, Gliwice.
- [34] KAŻMIERCZAK M., 2006, *Metodyka badań obrabiarek ciężkich w warunkach przemysłowych*, Rozprawa doktorska, Katedra Budowy Maszyn, Gliwice.

PROCEDURE OF STATIC STIFFNESS TESTS OF HEAVY MACHINE TOOLS

The paper presents specific problems related to the measurement of static stiffness of heavy machines tools in their operating environment. The applied research methods are discussed. Based on the experience gained in this type of research, the methodology of measurement was proposed.

Keywords: *heavy machine tools, static stiffness, operating environment*