

Otrzymano: 1 marca 2018 / Zaakceptowano: 10 maja 2018 / Zamieszczono na WWW: 20 grudnia 2018

*sztynność statyczna, tokarki karuzelowe,
obrabiarki ciężkie*

Janusz ŚLIWKA^{1*}
Maciej KAŻMIERCZAK¹

BADANIA SZTYWNOŚCI STATYCZNEJ TOKAREK KARUZELOWYCH

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań sztywności statycznej obrabiarek ciężkich (ze szczególnym uwzględnieniem tokarek karuzelowych) zrealizowanych przez Katedrę Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej we współpracy z fabryką obrabiarek RAFAMET mieszczącą się w Kuźni Raciborskiej. Przegląd przedstawionych w artykule wyników badań sztywności statycznej, obejmuje wyniki uzyskane dwoma alternatywnymi metodami: konwencjonalną i DWSS, czyli metodą Dynamiczną Wyznaczania Sztynności Statycznej. Zdobyte doświadczenie w efekcie przeprowadzonych prac pozwoliło sformułować wytyczne dotyczące w głównej mierze własności tokarek karuzelowych serii KCI, ale także w mniejszym stopniu rozpatrywanych frezarek bramowych, jak i tokarek podtorowych.

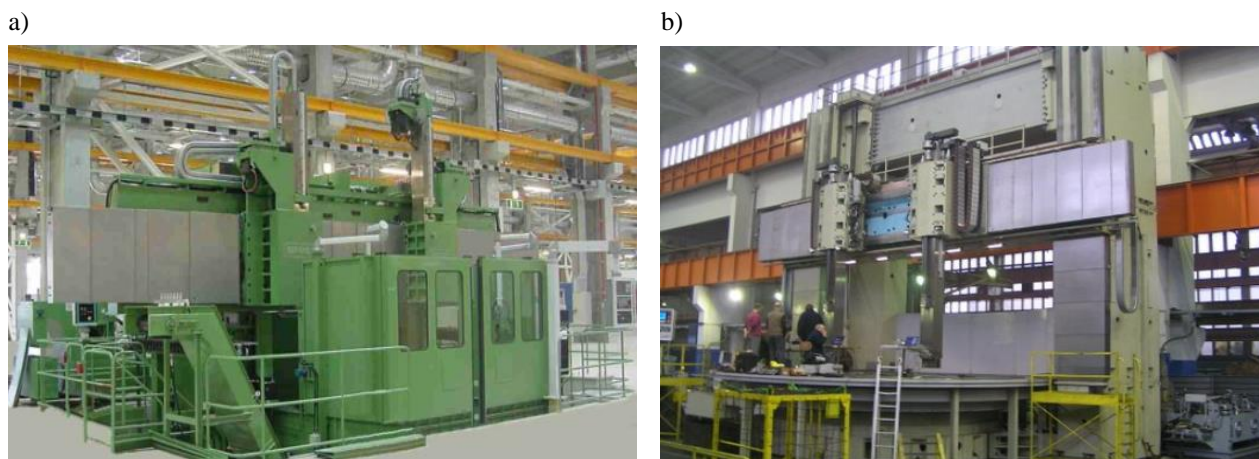
1. WSTĘP

Katedra Budowy Maszyn (KBM) Politechniki Śląskiej w Gliwicach jest jedną z niewielu jednostek naukowych w Polsce, która w okresie swojej działalności zrealizowała stosunkowo szerokie badania obrabiarek ciężkich. Badania te przeprowadzono w warunkach przemysłowych, tzn. zrealizowano je bezpośrednio na halach producenta lub w zakładach Klientów Raciborskiej Fabryki Obrabiarek, gdzie obrabiarki te pracowały. Trzon zrealizowanego zakresu badań stanowiły w głównej mierze badania sztywności statycznej, które w kilkunastu przypadkach uzupełniały badania dynamiczne mające jednak bardzo ograniczony zakres ze względu na istniejące ograniczenia czasowe. Tak jak już wspomniano przeprowadzenie tak szerokiego zakresu badań eksperymentalnych było możliwe dzięki współpracy KBM z przemysłem, a w szczególności z producentem obrabiarek ciężkich F.O. RAFAMET S.A. w Kuźni Raciborskiej.

Przedstawione w dalszej części artykułu wyniki badań stanowią wybór przykładowych wyników i dotyczą tylko badań sztywności statycznej, w głównej mierze tokarek karuzelowych przedstawionych na rys. 1. Pełne opisy wyników można znaleźć w licznych publikacjach KBM o zasięgu krajowym i międzynarodowym [1–3]. Efektem części prezentowanych tutaj badań były też prace doktorskie (np. [4, 5]), oraz szersze opracowania stanowiące niepublikowane sprawozdania oraz raporty z realizowanych projektów celowych.

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

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



Rys. 1. Widok ogólny tokarskich centrów karuzelowych: a) – KCI-210/280 NM; b) – KCI-500/550 NM
 Fig. 1. General view of the turning and boring lathe centers: a) – KCI-210/280 NM; b) – KCI-500/550 NM

Zestawione w dalszej części artykułu wyniki badań eksperymentalnych obrabiarek ciężkich uzyskano dwoma metodami badań sztywności statycznej:

- a) metodą konwencjonalną,
- b) metodą Dynamiczną Wyznaczenia Sztywności Statycznej (DWSS).

Dominującą rolę, jeżeli chodzi o zrealizowany zakres badań, stanowiła metoda DWSS, która dzięki swoim zaletom pozwalała na zwiększenie liczby analizowanych punktów pomiarowych na obrabiarce, a metoda konwencjonalna stanowiła jedynie uzupełnienie badań i uwzględniana była w szczególności w przypadku analizy newralgicznych punktów konstrukcyjnych obrabiarki. Szczegółowy opis metod badania sztywności statycznej można znaleźć w literaturze: metoda konwencjonalna (np. [6, 7]), metoda DWSS (np. [8, 9]).

Taki tok postępowania w przypadku tworzenia planów badań poszczególnych obrabiarek podyktowany był ograniczeniami posiadanego czasu, które wynikały z różnego okresu na jaki maszyny te były udostępniane do badań eksperymentalnych (maksymalnie było to 8 godzin). Szczegółowe plany badań formułowane w przypadku analizowanych obrabiarek obejmowały:

- a) badania sztywności statycznej metodą konwencjonalną:
 - wyznaczenie wskaźników sztywności suwaka (lub suwaków),
 - wyznaczenie wskaźników sztywności suportu (lub suportów).

Zalecane było w przypadku tej metody przeprowadzenie badań dla dwóch kierunków działania składowych siły obciążającej obrabiarkę: X i Y , oraz uwzględnienie dwóch różnych (skrajnych) wysuwów suwaka.

- b) badania sztywności statycznej metodą DWSS:
 - wyznaczenie wskaźników sztywności suwaka (lub suwaków),
 - wyznaczenie wskaźników sztywności suportu (lub suportów).

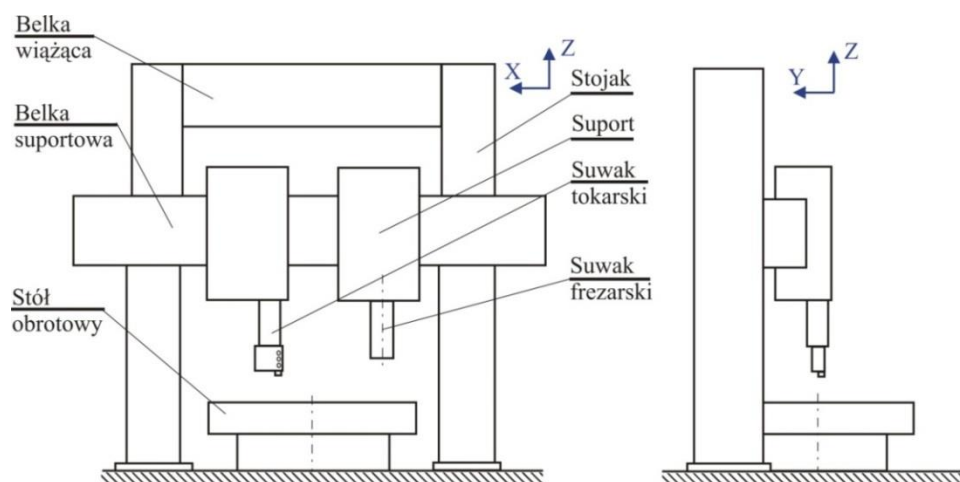
W tym przypadku zalecane było przeprowadzenie badań dla dwóch kierunków obciążenia obrabiarki: X i Y , oraz uwzględnienie dwóch różnych (skrajnych) wysuwów suwaka. Dodatkowo w każdym z powyższych przypadków należało przeprowadzić badania dla trzech częstotliwości siły wymuszającej 3, 5 i 7 Hz.

Tak formułowane plany badań uwzględniały zalecaną metodykę badań sztywności statycznej obrabiarek ciężkich prowadzonych w warunkach przemysłowych [5].

Istniejące ograniczenia czasowe mogły skłaniać do rezygnacji z prowadzenia badań metodą konwencjonalną, jednak za użyciem obu metod badań przemawiał między innymi fakt, że metoda konwencjonalna jest powszechnie używana w praktyce przemysłowej od wielu lat. Dlatego użycie jej w trakcie badań, nawet w minimalnym zakresie, umożliwiło odniesienie uzyskanych wyników do wyników badań zrealizowanych wcześniej w różnych ośrodkach naukowych i zakładach przemysłowych. Przykład takich bardzo rozbudowanych badań sztywności statycznej obrabiarek ciężkich zawiera praca doktorska autorstwa S. Zewelda [6].

2. ZAKRES BADAŃ

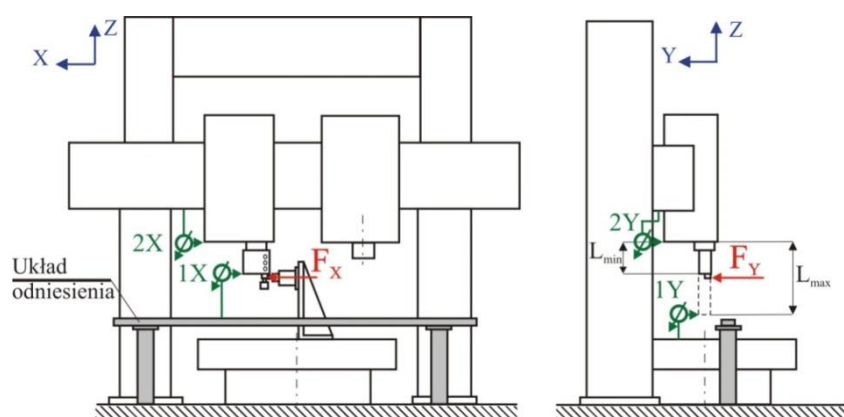
W ramach prezentowanych w niniejszym artykule wyników badań ogółem przebadano kilka tokarskich centrów karuzelowych. Pomiary koncentrowały się wokół przedstawionego powyżej ramowego planu badań i obejmowały wyznaczenie wskaźników sztywności suwaków oraz suportów. W kilku przypadkach wyznaczano dodatkowo sztywność stołu obrotowego. Pominięto natomiast badania stojaków obrabiarek. Krok ten podyktowany był ograniczeniami czasu badań oraz niewielkim wpływem sztywności tych elementów na wypadkową sztywność obrabiarki. W przypadku obrabiarek ciężkich odkształcenia korpusów stojaków i belki suportowej są pomijalnie małe. W pracy [6], zawierającej jedną z nielicznych pełnych analiz układów nośnych obrabiarek ciężkich, oszacowano procentowy udział odkształcenia stojaków na około 7% odkształceń całego układu nośnego obrabiarki. Na rys. 2 pokazano układ nośny tokarskiego centrum karuzelowego dwustojakowego, w konfiguracji z dwoma różnymi suwakami – lewym tokarskim i prawym frezarskim.



Rys. 2. Układ konstrukcyjny tokarskiego centrum karuzelowego typu KCI
Fig. 2. Design of the vertical machining center unit KCI type

Na podstawie analiz układów nośnych tokarskich centrów karuzelowych serii KCI założono, że z uwagi na duże podobieństwo konstrukcyjne, możliwe jest bezpośrednie porównanie wyników badań sztywności statycznej tych maszyn.

Pomiary przeprowadzono dla dwóch charakterystycznych położenia suwaka, tj. położenia odpowiadającego wysuwowi maksymalnemu L_{\max} (około 1200 mm) i wysuwowi minimalnemu L_{\min} (około 250 mm). Odpowiednio do wysuwu suwaka dobierano wartość siły obciążającej obrabiarkę. Maksymalne wartości sił obciążających podczas badań przyjęte zostały na podstawie sugestii producenta obrabiarek. Dla wysuwów minimalnych wartość siły obciążającej wynosiła około 30 kN, a dla wysuwów maksymalnych zmniejszała się do około 10 kN. Na rys. 3 przedstawiono rozmieszczenie czujników w przypadku badań z wymuszeniem siłowym w kierunkach osi X i Y.



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia czujników podczas badań tokarskiego centrum karuzelowego
Fig. 3. Distribution of sensors during the study of a vertical machining center

Czujniki oznaczone cyfrą „1” mierzą przemieszczenia suwaka, oznaczone cyfrą „2” przemieszczenia suportu. Dodatkowo należy zaznaczyć, że w przypadku badań metodą konwencjonalną czujniki indukcyjne bazowane były najczęściej ze stołu lub belki suportowej badanej obrabiarki, a rzadziej z niezależnego statywu (tak jak to pokazano na rys. 3). Badania prowadzono najczęściej dla jednej konfiguracji zespołów roboczych obrabiarki, odpowiadającej położeniu centralnemu badanego suportu.

3. WYNIKI BADAŃ – METODA KONWENCJONALNA

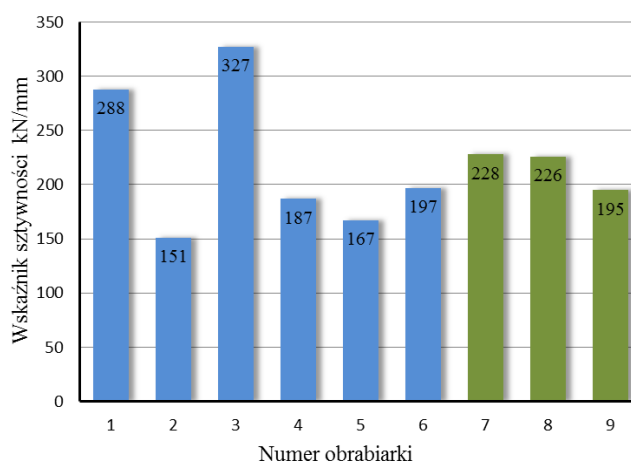
Przykładowe wyniki badań sztywnościowych zrealizowanych przy użyciu metody konwencjonalnej przedstawiono w tabeli 1. Dotyczą one wyników uzyskanych dla tokarskich centrów karuzelowych typu KCI-210/280 NM (oznaczone indeksami od 1 do 6), KCI-400/540 NM (oznaczona indeksem 7) i KCI-450/500 NM (oznaczona indeksem 8) oraz KCI-500/550 NM (oznaczona indeksem 9). W przypadku każdej z analizowanych obrabiarek w tabeli zamieszczono wyniki uzyskane dla suwaka lewego. Ze względu na

liniowość uzyskanych charakterystyk sztywnościowych do wyznaczenia wskaźników sztywności użyto metody pozwalającej na wyznaczenie ich jako ilorazu maksymalnej siły wymuszającej do maksymalnego zmierzonego przemieszczenia.

Tabela 1. Wyniki badań sztywności statycznej suwaków lewych centrów karuzelowych serii KCI
Table 1. Results of the static stiffness test of left-sliders carousel centers of the KCI series

Nr obr.	Typ obrabiarki	Wskaźnik sztywności statycznej kN/mm			
		j_{xx}		j_{yy}	
		wysuw min.	wysuw max.	wysuw min.	wysuw max.
1	KCI-210/280 NM	288	90		84
2	KCI-210/280 NM	151	105	172	66
3	KCI-210/280 NM	327	91	540*	
4	KCI-210/280 NM	187	57		157*
5	KCI-210/280 NM	167	57	165	48
6	KCI-210/280 NM	197	80		80
7	KCI-400/540 NM	228	89	161	73
8	KCI-450/500 NM	226	75	240	72
9	KCI-500/550 NM	195	100	213	39

Wielkości oznaczone w tabeli za pomocą (*) zostały odrzucone jako błędy grube pomiarów (test Grubbsa). Zastosowanie oprogramowania komputerowego w późniejszych pomiarach pozwoliło na natychmiastową weryfikację otrzymywanych wyników pomiarów, co w konsekwencji spowodowało wyeliminowanie błędów grubych. Miejsca puste w tabeli odpowiadają przypadkom, w których ze względu na zawężony plan badań wskaźniki sztywności nie zostały wyznaczone.

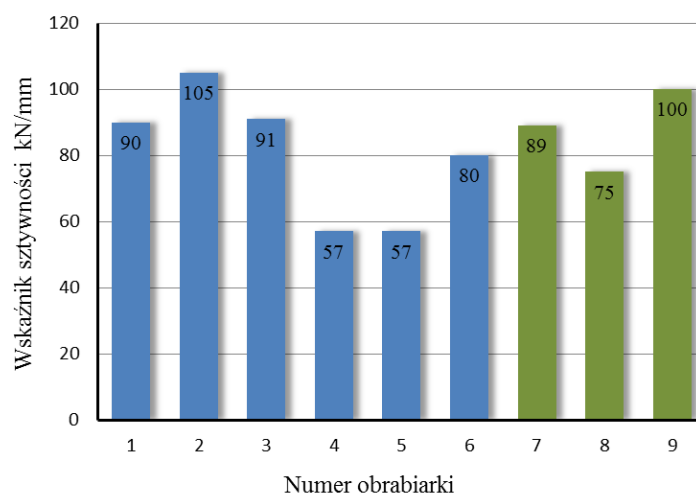


Rys. 4. Zestawienie wyników pomiarów sztywności statycznej j_{xx} suwaków lewych centrów tokarskich karuzelowych serii KCI; wyniki uzyskano dla minimalnego wysuwu suwaka

Fig. 4. List of measurement results on static stiffness j_{xx} of left sliders of vertical machining centers KCI series; results were obtained for the minimum extension of the slider

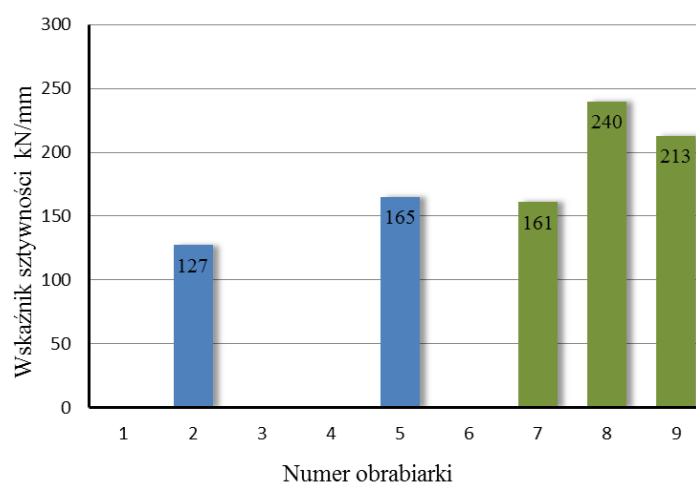
Zestawione w tabeli wyniki badań dodatkowo przedstawiono także na wykresie (rys. 4) gdzie uwzględniono jedynie wartości wskaźników sztywności j_{xx} , wyznaczonych dla suwaka lewego przy minimalnym wysuwie.

W przypadku wszystkich przebadanych obrabiarek zauważono znaczny rozrzut wyników, gdyż w każdym przypadku wartości wyznaczonych wskaźników sztywności różnią się w poszczególnych osiach pomiędzy kolejnymi obrabiarkami nawet o 116% od wartości 151 kN/mm do 327 kN/mm. Po zwiększeniu wysuwu suwaków do wartości maksymalnej (około 1200 mm) obserwuje się mniejszy rozrzut wyznaczonych wartości wskaźników sztywności (patrz rys. 5). Przyjmują one wartości od 57 do 105 kN/mm.



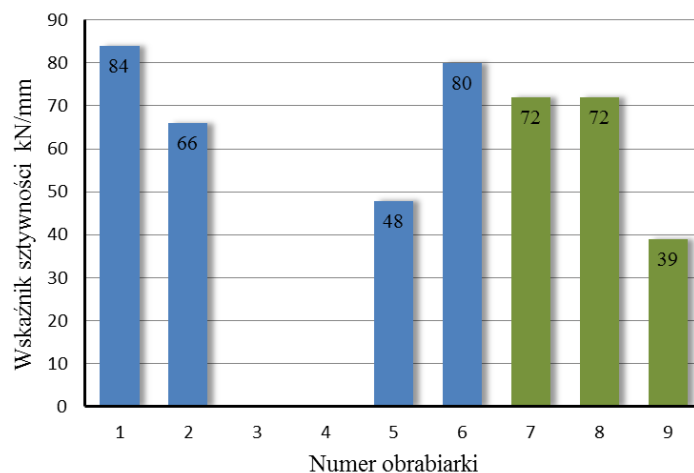
Rys. 5. Zestawienie wyników pomiarów sztywności statycznej j_{xx} suwaków lewych centrów tokarskich karuzelowych serii KCI; wyniki uzyskano dla maksymalnego wysuwu suwaka

Fig. 5. List of measurement results on static stiffness j_{xx} of left sliders of vertical machining centers KCI series; results were obtained for the maximum extension of the slider



Rys. 6. Zestawienie wyników pomiarów sztywności statycznej j_{yy} suwaków lewych centrów tokarskich karuzelowych serii KCI; wyniki uzyskano dla minimalnego wysuwu suwaka

Fig. 6. List of measurement results on static stiffness j_{yy} of left sliders of vertical machining centers KCI series; results were obtained for the minimum extension of the slider

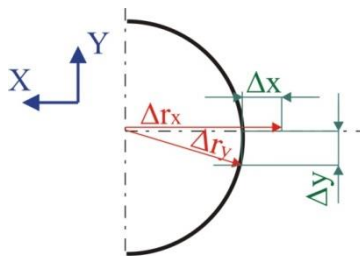


Rys. 7. Zestawienie wyników pomiarów sztywności statycznej j_{yy} suwaków lewych centrów tokarskich karuzelowych serii KCI; wyniki uzyskano dla maksymalnego wysuwu suwaka

Fig. 7. List of measurement results on static stiffness j_{yy} of left sliders of vertical machining centers KCI series; results were obtained for the maximum extension of the slider

Na kolejnych wykresach (rys. 6 i rys. 7) zestawiono wyniki pomiarów wskaźnika sztywności statycznej dla siły działającej w osi Y i przemieszczeń mierzonych w tym samym kierunku, tj. j_{yy} przy dwóch skrajnych wysuwach suwaka.

W przypadku toczenia łatwo można zauważyć dominujący wpływ sztywność j_{xx} (w porównaniu ze sztywnością j_{yy}) na dokładność obróbki. Na rys. 8 pokazano wpływ przemieszczenia w osi X i osi Y na zmianę promienia przedmiotu obrabianego podczas toczenia. Jak widać, przemieszczenie w osi X przenosi się w stosunku 1:1 na zmianę promienia toczonego przedmiotu. Wpływ przemieszczenia w osi Y na zmianę promienia jest nieznaczący. Przykładowo, dla przemieszczenia 0,1 mm w osi Y uzyskuje się zmianę średnicy obrabianego przedmiotu o średnicy 100 mm o około 0,00005 mm, tj. 0,05 μm . Z tego powodu pomiary sztywności statycznej suwaków tokarskich w osi Y mają drugorzędne znaczenie. Rozważania te, co jest oczywiste, nie są prawdziwe dla przypadku frezowania (dla suwaków frezarskich).



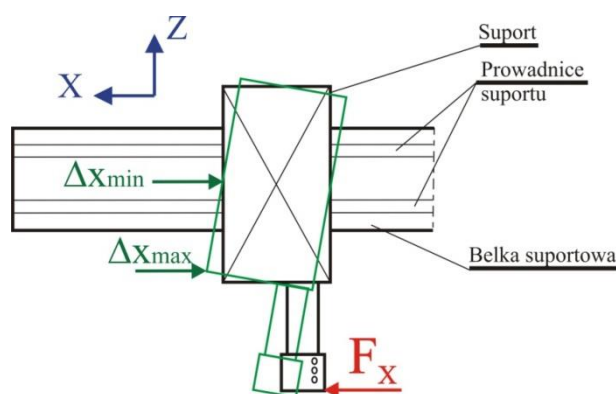
Rys. 8. Wpływ odkształceń w osiach X i Y na zmianę średnicy podczas toczenia

Fig. 8. The impact of deformations along X and Y axis on the diameter change during turning process

Analogicznie do zaprezentowanego powyżej zestawienia wyników badań sztywności suwaków lewych (suwaków tokarskich), można zestawić wyniki uzyskane dla suwaków

prawych (suwaków frezarskich). Badania suwaków frezarskich przeprowadzane były rzadziej z uwagi na to, że nie odnotowywano znaczących różnic pomiędzy ich właściwościami sztywnościowymi a właściwościami suwaków tokarskich. Uogólnienia dotyczące analiz wyników uzyskanych dla suwaków tokarskich będą prawdziwe również w odniesieniu do suwaków frezarskich.

W przypadku pomiaru wskaźnika sztywności statycznej suportów uzyskiwano bardzo duże rozrzuty wyników. Wyznaczone metodą konwencjonalną wskaźniki sztywności wahały się w zakresie od około 480 do około 3100 kN/mm. Przyczyny takiego stanu rzeczy należy upatrywać w tym, iż wynik pomiaru przemieszczeń w osi X jest mocno uzależniony od umiejscowienia czujnika przemieszczeń względem chwilowej osi obrotu suportu. Zjawisko to pokazano na rys. 9. W celu uniknięcia niejednoznaczności pomiaru spowodowanej obrotem suportu, w późniejszych badaniach przemieszczenia mierzone były w punkcie na dolnej krawędzi korpusu suportu.



Rys. 9. Ilustracja wpływu obrotu suportu na wielkość przemieszczeń mierzonych w kierunku osi X
 Fig. 9. Illustration of the impact of the carriage turn on dislocation range towards X axis

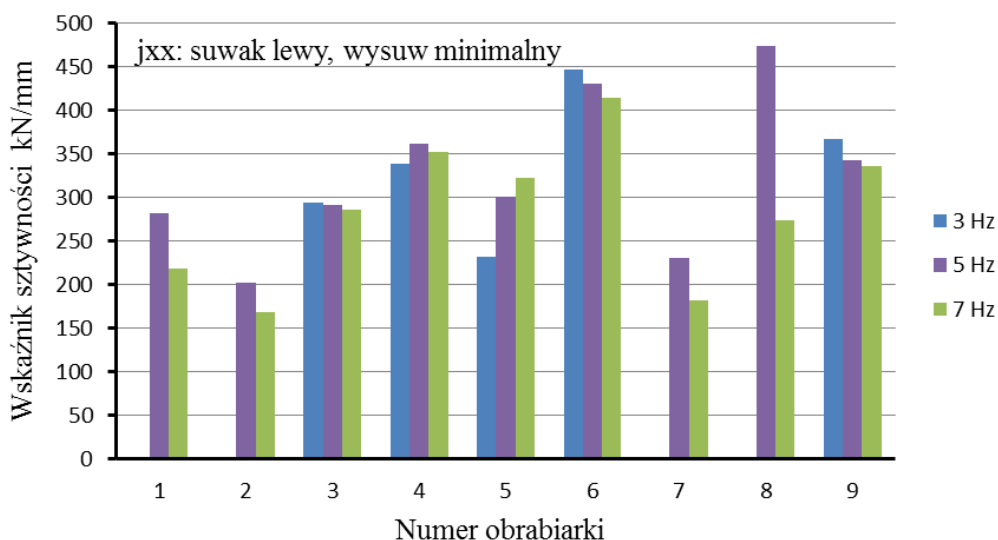
W trakcie analizy wyników należy pamiętać, że konsekwencją pomiarów dużej wartości sztywności (rzędu kilku tysięcy kN/mm) może być występowanie znaczących błędów związanych z pomiarem bardzo małych przemieszczeń. Błędy te występują niezależnie od zastosowanej metody pomiaru. Przykładowo, dla suportu o wskaźniku sztywności wynoszącym około 3100 kN/mm, podczas badań z maksymalną siłą wymuszającą 10 kN mierzono maksymalne przemieszczenia na poziomie poniżej 0,003 mm. W całej serii badanych obrabiarek w pojedynczych przypadkach wyznaczony był wskaźnik sztywności j_{zz} . W każdym z tych przypadków jego wartość przekraczała 600 kN/mm.

4. WYNIKI BADAŃ –METODA DWSS

Badania metodą DWSS przeprowadzono w analogicznych konfiguracjach stanowiska pomiarowego jak to opisano w przypadku metody konwencjonalnej. Wskaźniki sztywności wyznaczone zostały dla częstotliwości siły wymuszającej 3, 5, 7 Hz. Wybór wartości

częstotliwości wymuszeń wynika z badań prowadzonych w ramach pracy [5]. Wybrane wyniki badań suwaków i suportów lewych tokarskich centrów karuzelowych, uzyskane przy zastosowaniu metody DWSS pokazano w tabeli 2.

Z kolei na rys. 10 pokazano zestawienie wskaźników sztywności statycznej j_{xx} , uzyskanych dla suwaka lewego przy jego minimalnym wysuwie oraz przy trzech częstotliwościach siły wymuszającej (3, 5, 7 Hz).



Rys. 10. Zestawienie wyników pomiarów sztywności statycznej j_{xx} suwaków lewych centrów tokarskich karuzelowych serii KCI; wyniki uzyskano metodą DWSS dla minimalnego wysuwu suwaka

Fig. 10. List of measurement results on static stiffness j_{xx} of left sliders of vertical machining centers KCI series; results obtained by the use of DDSS method for the minimum extension of the slider

Podobnie jak w przypadku wyników badań prowadzonych metodą konwencjonalną, widać stosunkowo duży rozrzut otrzymywanych wskaźników dla różnych obrabiarek. Minimalny wskaźnik sztywności wyniósł 168 kN/mm (dla obrabiarki nr 2) a maksymalny 474 kN/mm dla obrabiarki nr 8, co daje 182% różnicy pomiędzy skrajnymi wartościami.

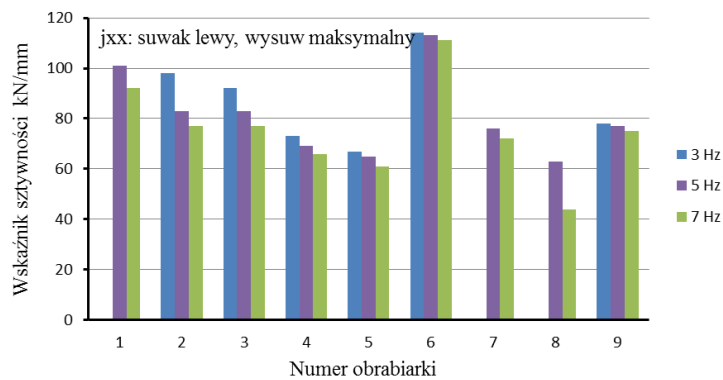
Na kolejnym rysunku (rys. 11) przedstawiono wyniki uzyskane dla maksymalnego wysuwu suwaka lewego również dla trzech częstotliwości siły wymuszającej. W przypadku wyników uzyskanych dla maksymalnego wysuwu suwaka występuje nieco mniejszy rozrzut wartości wskaźników sztywności niż miało to miejsce w przypadku wysuwu minimalnego. Rozrzut ten wyniósł od 44 kN/mm dla obrabiarki nr 8 do 114 kN/mm dla obrabiarki nr 6 (159% różnicy). Należy zauważyć, że w przypadku minimalnego wysuwu suwaka o mierzonej sztywności decyduje w głównej mierze sztywność stykowa pomiędzy suportem a suwakiem, a sztywność postaciowa samego suwaka ma mniejsze znaczenie. Wartość sztywności stykowej zależy od wielu czynników, między innymi takich, które mają charakter stochastyczny. Jednym z istotnych czynników mających wpływ na sztywność stykową jest sposób przeprowadzenia montażu. Dla pierwszych sześciu obrabiarek charakteryzujących się taką samą konstrukcją (centra karuzelowe KCI 210/280 NM), wskaźniki sztywności dla małych wysuwów suwaka różnią się zasadniczo. Przyczyny

takiego stanu rzeczy należy upatrywać przede wszystkim w sposobie montażu połączenia prowadnicowego suport-suwak. W przypadku maksymalnego wysuwu suwaka o jego sztywności decyduje sztywność postaciowa suwaka i w tym przypadku rozrzuty otrzymywanych wyników są mniejsze.

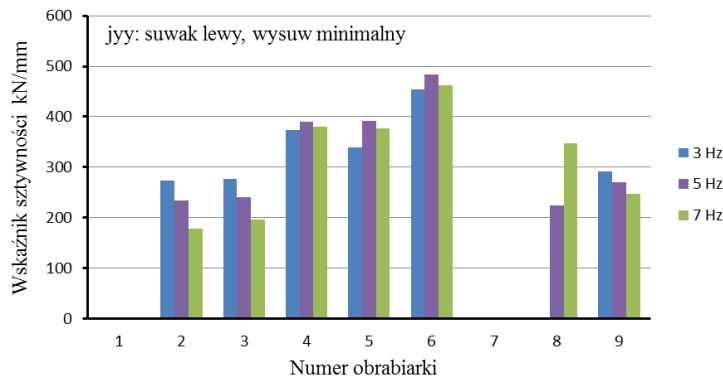
Tabela 2. Wyniki pomiarów wskaźnika sztywności statycznej metodą DWSS suwaków i suportów lewych tokarskich centrów karuzelowych (L_{\min} – minimalny wysuw suwaka; L_{\max} – maksymalny wysuw suwaka)

Table 2. Results of measurements of static stiffness index by DWSS method of sliders and supports of left lathe carousel centers (L_{\min} – minimum slider travel; L_{\max} – maximum slider travel)

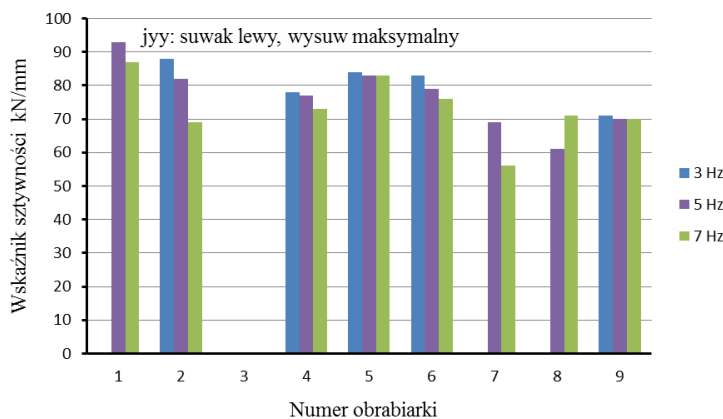
Obrabiarka	Częstotliwość siły wymuszającej	Wskaźnik sztywności kN/mm							
		Suwak lewy				Suport lewy			
	Hz	J_{xx}		J_{yy}		J_{xx}		J_{yy}	
		$L_{\min.}$	$L_{\max.}$	$L_{\min.}$	$L_{\max.}$	$L_{\min.}$	$L_{\max.}$	$L_{\min.}$	$L_{\max.}$
1	3								
	5	282	101		93	366	482		588
	7	219	92		87	280	351		456
2	3	854*	98	274	88	273	373		
	5	202	83	235	82	331	387		
	7	168	77	179	69	274	247		
3	3	294	92	277		1858	3938	533	
	5	291	83	241		2137	2634	515	
	7	286	77	197		1998	2120	357	
4	3	339	73	373	78	607		208	
	5	361	69	390	77	569	440	337	486
	7	352	66	380	73	528	419	385	464
5	3	232	67	339	84		430	495	358
	5	301	65	392	83	473	415	585	446
	7	323	61	377	83	481	348	593	471
6	3	447	114	454	83	598	564	206	
	5	430	113	483	79	570	547	343	480
	7	414	111	462	76	525	497	336	384
7	3								
	5	230	76	163	69	332		225	
	7	182	72	71	56	238		68*	
8	3								
	5	474	63	225	61	2995			
	7	274	44	347	71	1988			
9	3	367	78	78	291	499	554	251	285
	5	343	77	77	271	477	435	308	279
	7	336	75	75	248	439	391	277	158*



Rys. 11. Zestawienie wyników pomiarów sztywności statycznej j_{xx} suwaków lewych centrów tokarskich karuzelowych serii KCI; wyniki uzyskano metodą DWSS dla maksymalnego wysuwu suwaka
 Fig. 11. List of measurement results on static stiffness j_{xx} of left sliders of vertical machining centers KCI series; results obtained by the use of DDSS method for the maximum fed of the slider



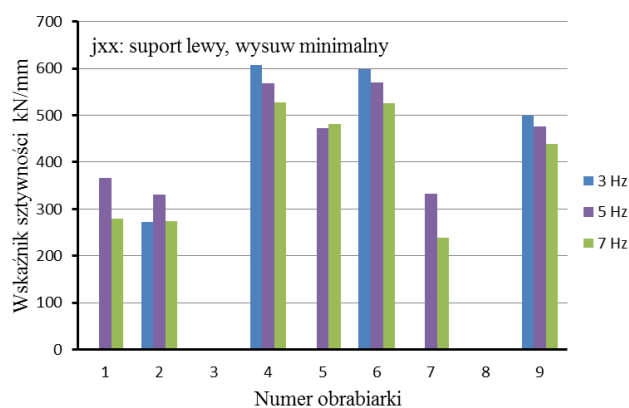
Rys. 12. Zestawienie wyników pomiarów sztywności statycznej j_{yy} suwaków lewych centrów tokarskich karuzelowych serii KCI; wyniki uzyskano metodą DWSS dla minimalnego wysuwu suwaka
 Fig. 12. List of measurement results on static stiffness j_{yy} of left sliders of vertical machining centers KCI series; results obtained by the use of DDSS method for the minimum extension of the slider



Rys. 13. Zestawienie wyników pomiarów sztywności statycznej j_{yy} suwaków lewych centrów tokarskich karuzelowych serii KCI; wyniki uzyskano metodą DWSS dla maksymalnego wysuwu suwaka
 Fig. 13. List of measurement results on static stiffness j_{yy} of left sliders of vertical machining centers KCI series; results obtained by the use of DDSS method for the maximum extension of the slider

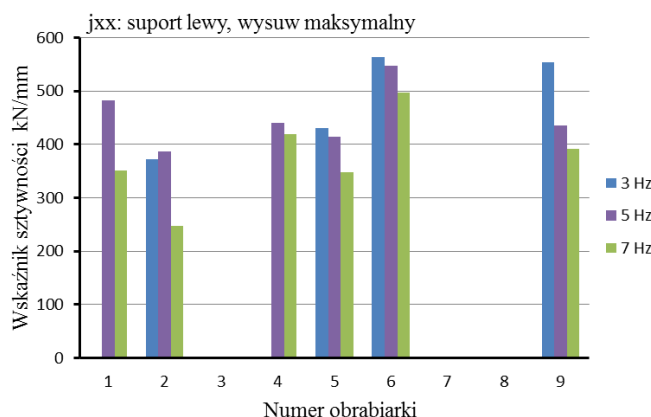
Na kolejnych rysunkach (rys. 12 i rys. 13) zestawiono wyniki uzyskane dla siły obciążającej, działającej w kierunku osi Y i przemieszczenia mierzonego w tym samym kierunku. Podobnie jak w przypadku wskaźnika sztywności j_{xx} , w przypadku wskaźnika j_{yy} obserwujemy zależność rozrzutu wyników pomiarów od wysuwu suwaka. W przypadku minimalnego wysuwu rozrzut wyników wynosi 169%, aby dla maksymalnego wysuwu suwaka zmaleć do 66%.

Pomiary sztywności suportów tokarskich centów karuzelowych metodą DWSS, podobnie jak w przypadku metody konwencjonalnej, mogą być obarczone błędem wynikającym ze skręcenia suportu w płaszczyźnie X-Z. Dlatego też w analizie wyników pominięto wskaźniki sztywności uzyskane dla obrabiarek nr 3 i nr 8. Otrzymane wyniki zestawiono na rys. 14 i rys. 15 w sposób analogiczny do przypadku wyników uzyskanych dla suwaków.



Rys. 14. Zestawienie wyników pomiarów sztywności statycznej j_{xx} suportów lewych centrów tokarskich karuzelowych serii KCI; wyniki uzyskano metodą DWSS dla minimalnego wysuwu suwaka

Fig. 14. List of measurement results on static stiffness j_{xx} of left carriages of vertical machining centers KCI series; results obtained by the use of DDSS method for the minimum extension of the slider



Rys. 15. Zestawienie wyników pomiarów sztywności statycznej j_{xx} suportów lewych centrów tokarskich karuzelowych serii KCI; wyniki uzyskano metodą DWSS dla maksymalnego wysuwu suwaka

Fig. 15. List of measurement results on static stiffness j_{xx} of left carriages of vertical machining centers KCI series; results obtained by the use of DDSS method for the maximum extension of the slider

W przypadku suportów tokarskich centrów karuzelowych można zaobserwować, podobnie jak w przypadku pomiarów sztywności suwaków, pewną zależność rozrzutu wyników pomiarów od wysuwu suwaka. W przypadku minimalnego wysuwu suwaka rozrzut wynosi: dla j_{xx} – 155%, dla j_{yy} – 187%, a w przypadku maksymalnego wysuwu: dla j_{xx} – 128% i dla j_{yy} – 111%.

5. PODSUMOWANIE

Podsumowując przedstawione w artykule badania eksperymentalne tokarskich centrów karuzelowych można stwierdzić, iż w wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych udało się pozyskać dużą bazę wiedzy dotyczącej własności sztywnościowych obrabiarek ciężkich, która niewątpliwie stanowi cenny materiał zarówno dla nowych konstrukcji jak i daje wytyczne i punkt odniesienia dla prac prowadzonych w przyszłości.

Tabela 3. Zakres wyznaczonych wskaźników sztywności suwaków tokarskich centrów karuzelowych serii KCI (metoda konwencjonalna)

Table 3. Range of determined indicators stiffness of sliders of turning centers KCI series (conventional method)

Wysuw suwaka	Wskaźnik sztywności kN/mm	
	j_{xx}	j_{yy}
$L_{min.}$	151 ÷ 327	161 ÷ 240
$L_{max.}$	57 ÷ 105	39 ÷ 84

Tabela 4. Zakres wyznaczonych wskaźników sztywności suwaków lewych tokarskich centrów karuzelowych serii KCI (metoda DWSS)

Table 4. Range of determined indicators stiffness of left sliders of turning centers KCI series (DWSS method)

Wysuw suwaka	Wskaźnik sztywności kN/mm	
	j_{xx}	j_{yy}
$L_{min.}$	168 ÷ 474	179 ÷ 483
$L_{max.}$	44 ÷ 114	56 ÷ 93

Tabela 5. Zakres wyznaczonych wskaźników sztywności suportów lewych tokarskich centrów karuzelowych serii KCI (metoda DWSS)

Table 5. Range of determined indicators stiffness of left carriages of turning centers KCI series (DWSS method)

Wysuw suwaka	Wskaźnik sztywności kN/mm	
	j_{xx}	j_{yy}
$L_{min.}$	238 ÷ 607	206 ÷ 593
$L_{max.}$	247 ÷ 564	279 ÷ 588

Uogólniając, z uwagi na fakt, iż badania dotyczyły obrabiarek podobnej, ale nie takiej samej konstrukcji, zasadne wydaje się pominięcie w analizie dążenia do podania uśrednionego wskaźnika sztywności dla rozpatrywanych przypadków. Bardziej miarodajny dla uzyskanych wyników powinien być zakres wyznaczonych wartości wskaźników sztywności, który przedstawiono w poniższych tabelach 3,4 i 5.

Zestawienie pozostałych wyników uzyskanych podczas badań tokarskich centrów karuzelowych typu KCI można znaleźć w raportach [10–13].

LITERATURA

- [1] KOSMOL J., ŚLIWKA J., KAŹMIERCZAK M., 2003, *Static stiffness determination of vertical lathes by means of dynamic method*, Materiały z II Międzynarodowej Konferencji, Modern Trends in Manufacturing, Wrocław.
- [2] KOSMOL J., ŚLIWKA J., 2003, *Powtarzalność cech statycznych obrabiarek ciężkich*, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, 84/41, I, Referaty plenarne i sesyjne, Wrocław, 533–540.
- [3] KAŹMIERCZAK M., 2002, *Investigation on Method of identification of static and dynamic properties of heavy machine tools*, Proceedings of the 4th International Scientific Conference DMC, Slovakia, Kosice, 22–23 May.
- [4] ŚLIWKA J., 2000, *Wyznaczanie sztywności statycznej obrabiarek metodą wymuszenia dynamicznego*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, 2, Gliwice.
- [5] KAŹMIERCZAK M., 2006, *Metodyka badań sztywności statycznej obrabiarek ciężkich w warunkach przemysłowych*, Rozprawa doktorska, Gliwice.
- [6] ZEWELD S., 1990, *Ocena porównawcza struktury nośnej obrabiarek ciężkich*, Rozprawa doktorska, Gliwice.
- [7] ŚLIWKA J., 1999, *Wyznaczanie sztywności statycznej obrabiarek metodą wymuszenia dynamicznego*, Rozprawa doktorska, Gliwice.
- [8] Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej., 1994, *Analiza konstrukcyjna tokarki karuzelowej KCH 250/280 NM*, Symbol pracy: NB-77/RMT-1/94, Pol. Śl., Gliwice.
- [9] KOSMOL J., ŚLIWKA J., 2000, *Nowa metoda wyznaczania sztywności statycznej obrabiarek ciężkich*, Wrocławskie Sympozjum Naukowo-Techniczne, Automatyzacja Produkcji 2000 – Wiedza, Technika, Postęp, Wrocław.
- [10] Praca naukowo-badawcza., 1994, *Analiza konstrukcyjna tokarki karuzelowej KCH 250/280 NM*, Symbol pracy: NB-77/RMT-1/94, Pol. Śl., Gliwice.
- [11] Praca naukowo-badawcza., 1993 *Analiza konstrukcyjna tokarki karuzelowej KCH-500/550NM*, Symbol pracy: NB-77/RMT-1/94, Pol. Śl., Gliwice.
- [12] Praca naukowo-badawcza., 1994, *Analiza konstrukcyjna tokarki karuzelowej KCH-700/800NM*, Symbol pracy: NB-77/RMT-1/94, Pol. Śl., Gliwice.
- [13] Projekt celowy KBN nr 10 T07 014 2000 C/5269., 2001, *Badania analityczne i weryfikacyjne badań doświadczalnych dwustojakowych karuzelowych centrów obróbkowych typu KCI*, Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, FO RAFAMET, Gliwice–Kuźnia Raciborska.

STATIC STIFFNESS INVESTIGATION OF VERTICAL LATHES

Present article presents results of static stiffness investigation of heavy machine tools (focusing particularly on vertical lathes) conducted by Machine Technology Department in cooperation with machine tool producer RAFAMET based in Kuźnia Raciborska. Presented feedback includes results obtained in the course of two methods: traditional and DDSS i.e. Dynamic Determination of Static Stiffness. The experience acquired as the result of the conducted study enabled to form guidelines concerning mainly properties of vertical lathes KCI series, and to a smaller extent, similar in construction heavy planner mills and underfloor wheelset lathes.

Keywords: *static stiffness, vertical lathes, heavy machine tools*