

Wacław Skoczyński

**Ocena własności obrabiarek
na podstawie dokładności
obróbki przedmiotów próbnych**



SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	8
1. WPROWADZENIE	12
2. METODY I CELE BADAŃ OBRABIAREK ORAZ STOSOWANE KRYTERIA OCENY	16
2.1. Ogólne cele i sposoby badań	16
2.2. Badania obrabiarki w stanie spoczynku	17
2.2.1. Badania dokładności geometrycznej	17
2.2.2. Badania własności statycznych	19
2.2.3. Badania własności dynamicznych układu konstrukcyjnego	23
2.3. Badania obrabiarki na biegu jałowym	26
2.3.1. Badania własności cieplnych	26
2.3.2. Badania błędów kinematycznych i powtarzalności pozycjonowania	28
2.4. Badania obrabiarki pod obciążeniem roboczym	31
2.4.1. Badania stabilności	31
2.4.2. Badania pracą i określanie możliwości technologicznych	34
2.5. Przydatność istniejących rodzajów badań do oceny własności obrabiarek	37
3. CEL I ZAŁOŻENIA PRACY	40
4. ANALIZA BŁĘDÓW PRZEDMIOTU OBRABIANEGO SPOWODOWANYCH CZYNNIKAMI WYNIKAJĄCYMI Z WŁASNOŚCI OBRABIAREK I PROCESU SKRAWANIA	42
4.1. Czynniki składające się na całkowitą odchyłkę wymiaru	42
4.2. Ustalenie dopuszczalnych odchyłek składowych całkowitej odchyłki wymiaru	49
5. METODA OCENY WŁASNOŚCI OBRABIAREK	57
5.1. Założenia metody oceny	58
5.2. Kryteria i wskaźniki oceny własności	61
5.3. Analiza rozkładu obciążeń w przestrzeni roboczej i stanów struktury	70
5.4. Analiza stosowanych narzędzi oraz rodzajów i parametrów obróbki	74
5.5. Czynniki wpływające na procedurę oceny własności obrabiarek	77
5.6. Wyznaczanie wskaźników oceny własności w badaniach prototypu	81
5.7. Wyznaczanie wskaźników oceny własności obrabiarek w toku konstruowania	83
6. WERYFIKACJA METODY OCENY	86
6.1. Opis obiektu badań	86
6.2. Baza danych przedmiotów obrabianych i jej funkcje	88
6.3. Analiza konstrukcji i zadań technologicznych	89

6.4. Ustalenie zbioru reprezentatywnych stanów obciążenia struktury układu konstrukcyjnego	98
6.5. Analiza i przyjęcie parametrów skrawania dla reprezentatywnych narzędzi	101
6.6. Program badań i metoda analizy wyników	103
6.7. Przyrządy, układy pomiarowe i oprogramownie	109
6.8. Wyznaczanie wskaźników oceny i analiza wyników badań	116
6.8.1. Analiza i ocena własności statycznych obrabiarek	116
6.8.2. Analiza i ocena błędów kształtu przedmiotu obrabianego	125
6.8.3. Analiza i ocena chropowatości powierzchni obrobionej	131
6.8.4. Globalna ocena tokarki	132
6.9. Określenie przydatności zaproponowanej metody badań do oceny własności obrabiarek	135
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	137
LITERATURA	144
SUMMARY	157

CONTENTS

1. INTRODUCTION	12
2. METHODS AND AIMS OF MACHINE TOOL TESTING AND ASSESSMENT	
CRITERIA USED	16
2.1. General aims and methods of testing	16
2.2. Tests on machine tool at a standstill	17
2.2.1. Geometrical checks	17
2.2.2. Testing of static properties	19
2.2.3. Testing of structural dynamic properties	23
2.3. Tests on machine tool running idle	26
2.3.1. Testing of thermal properties	26
2.3.2. Testing of kinematic errors and positioning repeatability	28
2.4. Tests on operating machine tools	31
2.4.1. Stability checks	31
2.4.2. Practical tests and determining machining capability	34
2.5. Suitability of the existing tests for evaluating machine tool properties	37
3. AIM AND UNDERLYING ASSUMPTIONS OF THE STUDY	38
4. ANALYSIS OF THE WORKPIECE ERRORS RELATED TO FACTORS RESULTING FROM MACHINE TOOL PROPERTIES AND THE MACHINING PROCESS	42
4.1. Factors contributing to the total dimensional deviation	42
4.2. Estimation of the permissible partial deviations of the total dimensional deviation	49
5. METHOD FOR EVALUATING MACHINE TOOL PROPERTIES	57
5.1. Underlying assumptions of the method	58
5.2. Criteria and indexes of evaluation	61
5.3. Analysis of the load distribution within the working space and of the structure configurations	70
5.4. Analysis of the tooling used and machining parameters employed	74
5.5. Factors affecting a procedure for evaluation of machine tool properties	77
5.6. Determination of evaluation indexes at the prototype stage	81
5.7. Determination of evaluation indexes at the design stage	83
6. VERIFICATION OF THE EVALUATION METHOD	86
6.1. Description of the object investigated	86
6.2. Workpiece database and its functions	88
6.3. Analysis of machine tool structure and manufacturing tasks	89
6.4. Determination of a representative set of structure load states	98

6.5. Analysis of machining parameters for a representative set of tools	101
6.6. Test program and the method adopted for analyzing the results	103
6.7. Measuring devices and the relevant software	111
6.8. Determination of the evaluation indexes and analysis of the experimental results	116
6.8.1. Analysis and evaluation of static properties of machine tool	116
6.8.2. Analysis and evaluation of geometrical errors of the workpiece	125
6.8.3. Analysis and evaluation of surface roughness	131
6.8.4. Complete evaluation of the testing machine tool	132
6.9. Applicability of the proposed method to evaluating properties of machine tools	135
7. SUMMARY AND CONCLUDING REMARKS	137
REFERENCES	144
SUMMARY	157

*obrabiarka, układ konstrukcyjny,
ocena własności,
kryteria i wskaźniki oceny*

Wacław SKOCZYŃSKI*

OCENA WŁASNOŚCI OBRABIAREK NA PODSTAWIE DOKŁADNOŚCI OBRÓBK PRZEDMIOTÓW PRÓBNYCH

Opracowano metodę kompleksowej oceny własności układów konstrukcyjnych obrabiarek i ich walorów eksploatacyjnych na podstawie badania dokładności obróbki przedmiotów próbnych i z uwzględnieniem stawianych maszynie zadań technologicznych. Metoda ta zakłada takie obciążanie obrabiarki, jakie występuje podczas realizacji stabilnego procesu obróbki wykańczającej. Dokładność obróbki jest oceniana przez pomiar i analizę odchyłek wymiarów próbnych przedmiotów obrabianych. Wprowadzono wskaźniki oceny, które uwzględniają związek między ocenianymi własnościami układu konstrukcyjnego a dokładnością obróbki przedmiotu próbnego. Umożliwiają one dokonanie zarówno całościowej oceny wpływu własności obrabiarki na uzyskaną klasę dokładności wymiarowo-kształtowej tego przedmiotu i jakość jego powierzchni, jak i ocen cząstkowych wpływu własności statycznych, dynamicznych i geometrycznych tej obrabiarki lub procesu skrawania na wspomnianą klasę. Wskaźniki te wiążą w czytelny sposób własności obrabiarki z efektami obróbki w postaci odchyłek wymiarów, odchyłek kształtu i chropowatości powierzchni obrabianego przedmiotu. Są one wyrażane ilościowo i odpowiadają wartościom liczbowym klas dokładności wymiarów ISO. Ich postać zależy od ogólnego celu oceny własności obrabiarek, gdyż zdefiniowane są w odniesieniu do badań prototypu i do badań odbiorczych. Wprowadzone wskaźniki i kryteria oceny własności i walorów eksploatacyjnych obrabiarek nadają się do włączenia do komputerowo wspartych procedur projektowania i optymalizacji układów konstrukcyjnych obrabiarek. Opracowana metoda oceny jest spójna z tymi procedurami, ponieważ umożliwia wykorzystanie wspólnych danych wejściowych i takich samych reprezentatywnych stanów konfiguracji struktury i stanów obciążeń układu konstrukcyjnego.

* Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- a, a_1, b, b_1, c, d – współczynniki aproksymowanych krzywych,
- a_p – głębokość skrawania, mm,
- a_{pi} – głębokość skrawania odpowiadająca i -temu naddatkowi, mm,
- A – dolna granica tolerancji wymiaru, μm ,
- B – górna granica tolerancji wymiaru, μm ,
- c_m – wskaźnik możliwości technologicznych obrabiarki,
- c_{mk} – krytyczny wskaźnik możliwości technologicznych obrabiarki,
- D – dowolny wymiar lub średnica, mm,
- D_a – maksymalna dopuszczalna średnica przelotu nad łożem, mm,
- D_s – średnia geometryczna granic przedziałów wymiarów nominalnych, mm,
- f – posuw, mm/obr,
- F – siła całkowita (wywierana przez ostrze), N,
- F_c – siła skrawania, N,
- $F_{c\text{max}}$ – siła skrawania odpowiadająca w danych warunkach wykorzystaniu pełnej mocy lub maksymalnego momentu skrawania na wrzecionie tokarki M_c , N,
- F_f – siła posuwowa, N,
- F_N – wypadkowa siła od napędu głównego, N,
- F_{No} – składowa obwodowa siły od napędu, N,
- F_{Nr} – składowa promieniowa siły od napędu, N,
- F_p – siła odporowa, N,
- G_x – podatność dynamiczna w kierunku x , $\mu\text{m}/\text{N}$,
- i – jednostka tolerancji normalnej dla klas tolerancji normalnych od IT5 do IT18 i wymiarów nominalnych ≤ 500 mm, μm ,
- i, j, k, l, m, n – indeksy dla współczynników wag i wskaźników oceny,
- I – jednostka tolerancji normalnej dla klas tolerancji normalnych od IT1 do IT18 i wymiarów nominalnych > 500 mm, mm,
- IT – tolerancja normalna, mm,
- l – odcinek elementarny (podczas wyznaczania chropowatości), mm,
- l_w – odcinek pomiarowy falistości, mm,

L	– długość przedmiotu obrabianego; rozmiar przestrzeni roboczej w kierunku osiowym, mm,
L_w	– odległość od powierzchni czołowej szczęk uchwytu do miejsca, od którego rozpoczynano skrawanie przedmiotu próbnego, mm,
M_c	– moment skrawania, N·m,
M_{\max}	– maksymalny moment skręcający na wrzecionie, N·m,
n	– prędkość obrotowa, obr/min,
n_R	– liczba uwzględnionych rodzajów obróbki,
n_M	– liczba uwzględnionych sposobów mocowania,
n_N	– liczba uwzględnionych narzędzi,
n_1, n_2, n_3	– liczby elementów podziału przestrzeni roboczej w kierunkach osi 1, 2 i 3, przyjętego trójwymiarowego układu współrzędnych,
R_a	– średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości, μm ,
R_m	– maksymalna wysokość chropowatości, μm ,
R_t	– maksymalna wysokość chropowatości między linią wzniesień a linią wgłębień profilu w przedziale odcinka elementarnego (oznaczenie równoważne R_m), μm ,
R_z	– wysokość chropowatości według 10 punktów, μm ,
r_ϵ	– promień zaokrąglenia wierzchołka noża, mm
s	– odchylenie standardowe,
s_{pom}	– odchylenie standardowe środków (narzędzi) pomiarowych, μm ,
T	– tolerancja wykonania, μm ,
T_c	– całkowity czas maszynowy, h,
T_{\min}	– minimalna tolerancja mierzonej wielkości, μm ,
v_c	– prędkość skrawania, m/min,
v_f	– prędkość posuwu, m/min,
w_{ijklmn}	– współczynnik wagi, uwzględniający wystąpienie obciążenia w pojedynczej podprzestrzeni, $n_1 \times n_2 \times n_3$ -elementowej przestrzeni roboczej, wyznaczony dla określonego n -tego rodzaju obróbki, m -tego sposobu mocowania i l -tego narzędzia,
w_m^M	– współczynnik wagi uwzględniający m -ty sposób mocowania przedmiotu obrabianego,
w_l^N	– współczynnik wagi uwzględniający l -ty rodzaj narzędzia,
w_n^R	– współczynnik wagi uwzględniający n -ty rodzaj obróbki,
W	– wskaźnik oceny,
W_{dop}	– dopuszczalna wartość wskaźnika oceny,
W_{dop}^S	– wskaźnik oceny własności statycznych, odpowiadający obciążeniu maksymalną siłą skrawania F_{cmax} ,

- W_g – globalny wskaźnik oceny,
 W_g^c – globalny wskaźnik oceny chropowatości powierzchni,
 W_g^k – globalny wskaźnik oceny błędów kształtu,
 W_g^{OUN} – globalny wskaźnik oceny układu konstrukcyjnego obrabiarki,
 W_g^s – globalny wskaźnik oceny własności statycznych,
 W_{ijklmn} – lokalny wskaźnik oceny w pojedynczej podprzestrzeni, $n_1 \times n_2 \times n_3$ -elementowej przestrzeni roboczej, wyznaczony dla określonego n -tego rodzaju obróbki, m -tego sposobu mocowania i l -tego narzędzia,
 W_{lmn} – lokalny wskaźnik oceny, wyznaczony w miejscu przestrzeni roboczej, odpowiadającemu położeniu maksimum rozkładu obciążeń, dla określonego n -tego rodzaju obróbki, m -tego sposobu mocowania i l -tego narzędzia,
 W_m – maksymalna wysokość profilu falistości, μm ,
 W_o – odbiorczy wskaźnik oceny,
 W_o^c – odbiorczy wskaźnik oceny chropowatości powierzchni,
 W_o^k – odbiorczy wskaźnik oceny błędów kształtu,
 W_o^{OUN} – odbiorczy wskaźnik oceny układu konstrukcyjnego obrabiarki,
 W_o^s – odbiorczy wskaźnik oceny własności statycznych,
 W_t – maksymalna wysokość falistości między linią wzniesień a linią wgłębień skorygowanego profilu falistości w przedziale odcinka pomiarowego, μm ,
 W_z – wysokość falistości, μm ,
 x_i – współrzędne wierzchołka noża, odpowiadające promieniowi toczenia, mm,
 \bar{x} – średnia arytmetyczna,
 z_i – współrzędne wierzchołka noża odpowiadające odległości od powierzchni czołowej szczęk uchwytu, mm,
 α – kąt przyłożenia, $^\circ$,
 γ – kąt natarcia, $^\circ$, lub funkcja koherencji,
 δ – względne przemieszczenie między stołem i narzędziem, μm ,
 ΔB_{tr} – odchyłka bicia promieniowego całkowitego, μm ,
 ΔB_{tr}^{okr} – odchyłka bicia promieniowego całkowitego, przedmiotu obrabianego umieszczonego na stole okrągłościomierza, μm ,
 ΔB_{tr}^{uch} – odchyłka bicia promieniowego całkowitego, przedmiotu obrabianego zamocowanego w uchwycie tokarki, μm ,
 Δd – odchyłka wymiaru, μm ,
 Δd^s – odchyłka wymiaru spowodowana odkształceniami statycznymi układu, μm ,
 Δd^k – odchyłka wymiaru wywołana błędami geometrycznymi i drganiami obrabiarki, μm ,
 Δd^c – odchyłka wymiaru związana z chropowatością powierzchni, μm ,

- $\Delta d'$ – odchyłka równoległości osi wrzeciona do przesuwu suportu wzdłużnego, μm ,
- ΔD – całkowita odchyłka wymiaru; ekwiwalentna całkowita odchyłka wymiaru; całkowita odchyłka średnicy toczenia; ekwiwalentna całkowita odchyłka średnicy, μm ,
- ΔZ_q – odchyłka okrągłości względem środka okręgu średniego, μm ,
- ΔZ_q^{15} – odchyłka okrągłości, odzwierciedlająca wpływ błędów geometrycznych (po zastosowaniu filtra dolnoprzepustowego, przenoszącego fale nierówności w zakresie od 2 do 15 fal na obrót przedmiotu), μm ,
- ΔZ_q^{150} – odchyłka okrągłości, ujmująca wpływ drgań tokarki (po zastosowaniu filtra środkowoprzepustowego, przenoszącego fale nierówności w zakresie od 15 do 150 fal na obrót przedmiotu), μm ,
- κ – kąt przystawienia, $^\circ$,
- λ_F – graniczna długość fali filtra kształtu, mm,
- λ_R – graniczna długość fali filtra chropowatości, mm,
- λ_s – graniczna długość fali filtra do usuwania z profilu bardzo stromych wzniesień, mm,
- φ – kąt przesunięcia fazowego, $^\circ$ lub rad,

1. WPROWADZENIE

Obrabiarki skrawające są zaliczane do najważniejszych środków wytwórczych w dziedzinie obróbki metali. Z punktu widzenia użytkownika współczesne obrabiarki powinny spełniać kilka wymagań, które są często ze sobą sprzeczne. Można je zdefiniować następująco [10, 92]:

- osiągnięcie dużej dokładności wymiarowo-kształtowej, a szczególnie powtarzalności wymiarowej wyrobów,
- duża wydajność, w celu osiągnięcia krótkiego czasu wytwarzania (znacznie zwiększona prędkość ruchu roboczego i ruchu jałowego zespołów obrabiarki),
- duża elastyczność – zdolność do realizacji różnych zadań produkcyjnych, szybkie przezbieranie obrabiarki i szybka wymiana programu sterowania,
- rozszerzenie możliwości wykonania różnych zabiegów technologicznych na jednej obrabiarce,
- zwiększona moc silników napędowych i zwiększona liczba silników do ruchów posuwowych (możliwość jednoczesnej obróbki przedmiotu kilkoma narzędziami),
- małe koszty wytwarzania,
- niezawodność pracy,
- ograniczenie szkodliwych oddziaływań na środowisko i bezpieczna praca.

Znaczenie poszczególnych wymagań zależy przede wszystkim od zakresu zastosowań obrabiarki. Ostateczne priorytety tych wymagań i kryteria oceny ustala użytkownik, a producent jest zazwyczaj zmuszony do nich się dostosować.

Czynnikiem wymuszającym zmiany w konstrukcji obrabiarek jest zmniejszenie rozmiarów serii produkcyjnych i polepszenie jakości partii wyrobów [35]. W przyszłości oczekiwania w stosunku do producentów obrabiarek będą się skupiać na wytwarzaniu wielu typów systemów wytwórczych, z ponoszeniem minimum kosztów, co będzie prowadziło do budowy obrabiarek tylko z takim wyposażeniem, które będzie potrzebne do osiągnięcia założonej wielkości produkcji [35].

Wobec stale rosnących wymagań dotyczących dokładności i wydajności obróbki, konstruktorom stawia się zadania optymalnego projektowania elementów składowych tych maszyn. Wymaga to z jednej strony obszernej wiedzy na temat związków między własnościami obrabiarki i jej walorami eksploatacyjnymi a konstrukcyjnym ukształtowaniem jej elementów składowych, z drugiej zaś dysponowania sposobami oceny kon-

kretnych rozwiązań konstrukcyjnych. Celowe wydaje się zatem wprowadzenie jednokowych metod i kryteriów oceny stosowanych w procesie konstruowania i na etapie badań prototypu lub odbiorczych. Należy sobie jednak zdawać sprawę z tego, że w przypadku metod obliczeniowych modelowania układów konstrukcyjnych obrabiarek zawsze wystąpią nieuniknione błędy związane z dyskretyzacją struktury, z przyjmowaniem parametrów dysypatywno-sprężystych i z nieuwzględnieniem czynników związanych z dokładnością wykonania elementów składowych obrabiarki i ich montażu. Metody eksperymentalne stawiają z kolei pewne ograniczenia związane z metodą pomiaru i sposobem obciążenia obrabiarki. Trudne jest też odniesienie wyników badań do konkretnych elementów konstrukcyjnych w celu dokonania pożądanej modyfikacji ich parametrów. Spójność metod i kryteriów oceny stosowanych w procesie konstruowania i w badaniach obiektu rzeczywistego umożliwiłaby dodatkowo bezpośrednie odnoszenie wyników obliczeń do wyników pomiarów oraz weryfikację i doskonalenie modelu obliczeniowego.

Szybki rozwój środków komputerowego wsparcia konstruowania dostarczył wielu narzędzi do efektywnego kształtowania konstrukcji maszyn i obliczeniowego wyznaczania własności projektowanych elementów. W dziedzinie kryteriów oceny obrabiarek występują jednak obecnie znaczne braki w porównaniu ze stanem rozwoju metod obliczeniowych [155], co w znacznym stopniu ogranicza możliwości racjonalizacji decyzji konstruktorskich [50]. Ocena rozwiązań konstrukcyjnych przeprowadzana jest najczęściej na podstawie przyjętych a priori przez konstruktora wskaźników lub parametrów odniesienia, często oderwanych od właściwości eksploatacyjnych, na które oceniane własności mają wpływ. Pełna ocena decyzji podjętych podczas kształtowania układu jest jednoznaczna z oceną jego własności statycznych, dynamicznych i cieplnych [65]. Aby ją skutecznie zrealizować konieczne jest jednak dysponowanie modelem oceny uwzględniającym te własności oraz systemem mierników i kryteriów [65, 68, 71]. W celu pełnego wykorzystania technik komputerowego wsparcia konstruowania, konieczne jest więc podjęcie prac zmierzających do opracowania odpowiednich kryteriów oceny.

Technika pomiarowa, w porównaniu z obliczeniową, dostarcza wiarygodniejszych danych do oceny konstrukcji maszyny. Badania doświadczalne są jednak znacznie kosztowniejsze, gdyż wymagają z jednej strony materializacji konstrukcji w postaci prototypu, a z drugiej dysponowania odpowiednią metodą i zestawem aparatury pomiarowej. Uzyskane wyniki umożliwiają dokonywanie porównań różnych wariantów konstrukcyjnych lub różnych obrabiarek tego samego typu, mogą także służyć do oceny ich charakterystyk. Na podstawie charakterystyk rzadko jednak dokonuje się oceny ilościowej. Niewłaściwie dobrane wskaźniki oceny prowadzą często do zaskakujących wyników. Przykładem mogą być wskaźniki względnej statycznej i dynamicznej podatności (uwzględniające moc napędu głównego), wyznaczone na podstawie szeroko zakrojonych badań prowadzonych w niemieckim przemyśle obrabiarkowym, na próbie kilkuset obrabiarek różnego typu, których konstrukcje uznano przez producentów za „dobre” [156]. Wyznaczone wskaźniki miały duży rozrzut i w skrajnych przypadkach w grupie obra-

biarek tego samego typu różniły się od siebie nawet kilkunastokrotnie. Może to tylko świadczyć o złym doborze metod badań i wskaźników, którym przypisano kluczową rolę podczas oceny konstrukcji obrabiarki.

Jedynym racjonalnym odniesieniem podczas oceny obrabiarki jest punkt widzenia użytkownika. Jest on zainteresowany przede wszystkim właściwościami eksploatacyjnymi maszyny. Podczas formułowania kryteriów oceny istotne jest zatem, aby powiązane były one z osiąganą dokładnością wykonania przedmiotów obrobionych i z wydajnością tej maszyny [156]. Wydajność jest pochodną zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego układu kinematycznego, mocy zainstalowanego silnika napędu głównego, rodzaju i sterowania napędu posuwów, rodzaju i trwałości ostrza narzędzia, stopnia automatyzacji oraz rodzaju zainstalowanego oprzyrządowania. Czynniki te niewątpliwie wpływają na ukształtowanie konstrukcji. Osiągi obrabiarki mierzy się, w wypadku oceny wydajności, liczbą detali wykonanych w jednostce czasu. Własności obrabiarki muszą jednak umożliwić wykonanie wymaganej liczby detali z założoną dokładnością obróbki. Ze względów ekonomicznych własności obrabiarki nie powinny być dużo lepsze niż wymagają tego stawiane warunki technologiczne, gdyż „obrabarka powinna być tylko tak dobra, jak tego wymaga spektrum przedmiotów, jakie mają być na niej obrabiane” [156]. Ciekawe motto dotyczące dokładności wytwarzania podano w podręczniku Milberga [92]: *na tyle zgrubnie, na ile to możliwe – na tyle dokładnie, na ile to konieczne*.

Podczas formułowania kryteriów oceny należy więc połączyć wskaźniki oceny obrabiarki z uzyskiwaną dokładnością obróbki [65]. Umożliwia to ocenę własności obrabiarki ze względu na możliwą do uzyskania (w przypadku analizy obliczeniowej) lub uzyskiwaną (w przypadku badań doświadczalnych) dokładność obróbki, jeden z najważniejszych dla użytkownika wskaźników jakości obrabiarki.

Dotychczas brak jest efektywnych metod umożliwiających jednoznaczną ocenę własności układu konstrukcyjnego obrabiarki. Przyczyną tego stanu rzeczy jest nieuwzględnianie w procedurach oceny cech charakteryzujących te układy, które wyraźnie odróżniają obrabiarki od innych maszyn roboczych. Należą do nich [65]:

- złożoność układu – jest to układ przestrzenny o dużej liczbie stopni swobody i zmiennej strukturze, przy czym struktura ta może zmieniać się w szerokich granicach, nie tylko dla różnych zadań obróbkowych, ale także podczas wykonywaniu jednego zabiegu,

- złożoność stanu obciążenia układu – jest wynikiem z jednej strony tego, że na układ obrabiarki działają zmienne siły związane zarówno z realizowanym procesem, jak i pochodzące od układów napędowych, z drugiej strony zaś jest następstwem różnych położenia punktu zaczepienia wypadkowej siły skrawania, w przestrzeni roboczej obrabiarki,

- zmienność stanu układu – wynika przede wszystkim ze zmian stanu cieplnego układu konstrukcyjnego, zmian intensywności smarowania połączeń ruchowych, zmienności rozkładu nacisków na powierzchniach stykowych, co występuje np. podczas realizacji

różnych zadań obróbkowych bądź też może być wywoływane czynnikami zewnętrznymi,

- sprzężenia między układem masowo-sprężystym i realizowanym procesem skrawania – powodują, że pracująca obrabiarka jest układem zamkniętym.

Z wymienionych cech układów konstrukcyjnych obrabiarek wynikają warunki, jakie powinny spełniać technika pomiarowa i metody obliczeniowe, aby uzyskiwane wyniki mogły zapewnić możliwość oceny własności tych układów. Należy przy tym zwrócić uwagę na to, że obliczeniowa ocena własności obrabiarki jest możliwa, ale nie może być pełna ze względu na niemożność uwzględnienia czynników, które są związane z rzeczywistymi warunkami pracy tej maszyny, takimi jak warunki obciążenia podczas skrawania, stan cieplny i warunki chłodzenia, smarowanie, rozkład nacisków na prowadnicach, luzy w połączeniach itp. Natomiast w odniesieniu do techniki pomiarowej należy stwierdzić jednoznacznie, że jedynie badania obrabiarki wykonane w warunkach ruchowych, z jednoczesną realizacją procesu skrawania, umożliwiają uwzględnienie wszystkich wymienionych czynników podczas badania i dokonywania oceny konstrukcji.

Dokładność obróbki osiąganą na danej obrabiarence ocenia się na podstawie porównania zgodności wykonania przedmiotu obrobionego z narzuconymi wymaganiami dotyczącymi tolerancji wymiarów, kształtu i położenia oraz jakości powierzchni obrobionej. Oceniane są więc wielkości związane z różnymi powierzchniami tego przedmiotu. Do diagnozowania stanu obrabiarek mogą być wykorzystane badania widmowej gęstości mocy profilu powierzchni obrobionej. Zakłada się w nich, że praca obrabiarki może być traktowana jako proces kodowania w strukturze geometrycznej powierzchni obrobionej informacji o stanie technicznym jej zespołów bądź funkcjonalnie ważnych elementów [98]. Ze względu na to, że własności obrabiarki wielorako oddziałują na jej walory eksploatacyjne, trudno jest oszacować wpływ pojedynczego czynnika na osiąganą dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotu obrobionego. Praca zmierzać więc będzie do opracowania takiego zestawu wskaźników, który pozwoli ocenić wpływ własności obrabiarki na dokładność obróbki uzyskaną w rzeczywistych warunkach roboczych i stwierdzić czy maszyna ta spełnia wymagania dotyczące dokładności obróbki wykańczającej.

2. METODY I CELE BADAŃ OBRABIAREK ORAZ STOSOWANE KRYTERIA OCENY

2.1. OGÓLNE CELE I SPOSOBY BADAŃ

W przemyśle obrabiarek skrawających przeprowadza się badania prototypów i badania odbiorcze. Pierwszy rodzaj badań obejmuje zespół doświadczeń i pomiarów przeprowadzonych według ustalonej metody, która ułatwia i przyspiesza dokonanie oceny obiektu badań na podstawie ustalonego kryterium oceny [140]. Badania prototypu powinny dostarczyć podstaw do oceny:

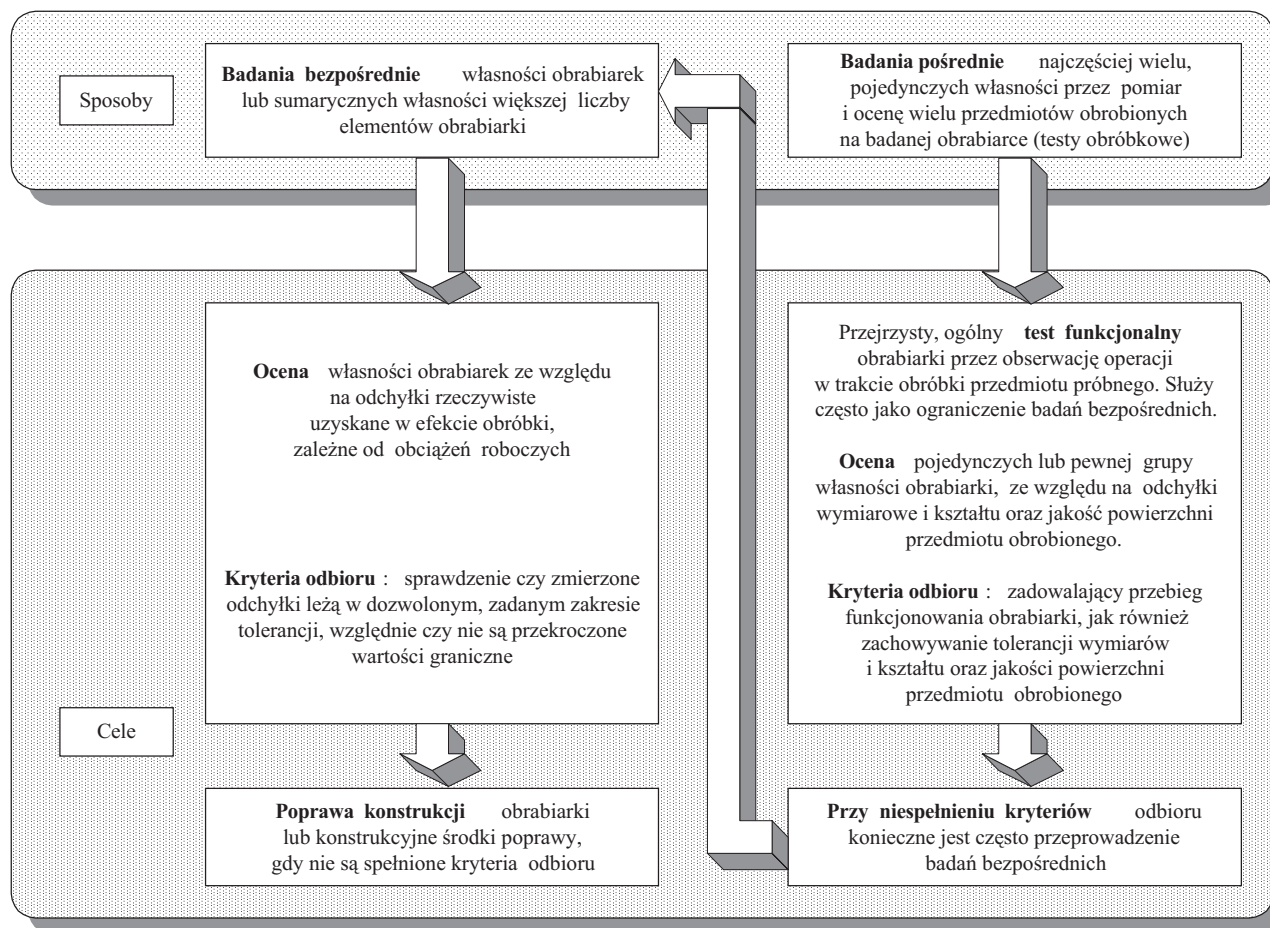
- stopnia spełnienia założeń konstrukcyjnych i technologicznych,
- stopnia spełnienia wymagań odbiorczych określonych przez: warunki odbioru technicznego, obowiązujące normy i kryteria ustalone przez konstruktora w czasie badań innych prototypów.

Badania odbiorcze wykonuje się na każdej seryjnie wyprodukowanej obrabiarce. Ograniczają się one często do pomiarów dokładności geometrycznej, testów obróbkowych i sprawdzenia wymagań ujętych w normach. Stanowią one zawężenie badań prototypu.

Badanie obrabiarek może następować drogą bezpośrednią (przez wyznaczenie własności układu) lub pośrednią (poprzez testy obróbkowe i próby pracą) (rys. 2.1). Może być ono podporządkowane dwu głównym celom: sprawdzaniu właściwości eksploatacyjnych i ustalaniu sposobów poprawy konstrukcji w razie stwierdzenia nieodpowiednich własności.

Badania bezpośrednie umożliwiają analizę wpływu poszczególnych czynników określających własności statyczne, dynamiczne i cieplne obrabiarki, a tym samym umożliwiają ustalenie przyczyn niewłaściwego zachowania się układu oraz stwarzają obiektywną podstawę do przeprowadzenia efektywnych zmian konstrukcyjnych. Zastosowanie tego typu badań do oceny własności maszyny technologicznej jest jednakże bardzo pracochłonne i wymaga dysponowania stosunkowo złożonymi układami pomiarowymi oraz odpowiednimi kryteriami i miernikami oceny.

Badania pośrednie są stosunkowo proste i łatwe do przeprowadzenia, ale umożliwiają jedynie sumaryczne ujęcie właściwości eksploatacyjnych i zwykle nie pozwalają na wyciąganie wniosków odnoszących się do środków poprawy własności układu konstrukcyjnego. Zastosowanie tego typu badań jest szczególnie efektywne w bada-



Rys. 2.1. Cele i sposoby badań obrabiarek i ich ocena [161]

Fig. 2.1. Aims and methods of the machine tool testing and evaluation [161]

niach odbiorczych obrabiarek, podczas gdy badania bezpośrednie powinny przede wszystkim znaleźć zastosowanie w badaniach prototypów.

Badania obrabiarek przeprowadza się na obrabiarce ustawionej i uruchomionej zgodnie z wytycznymi ujętymi w dokumentacji techniczno-ruchowej (DTR). Każda obrabiarka powinna odbyć wstępne docieranie, po czym ustala się luzy montażowe i ustawcze do wartości podanych przez DTR, warunki odbioru technicznego (WOT) lub stosowane w czasie normalnej eksploatacji [140, 216]. Powinna też być ona doprowadzona do stanu stabilizacji termicznej i zabezpieczona przed wpływem zewnętrznych źródeł ciepła [187].

W zależności od charakteru badań są one wykonywane na obrabiarce unieruchomionej (będącej w stanie spoczynku), pracującej na biegu jałowym (nieobciążonej), obciążonej siłami i momentami zastępczymi lub w czasie skrawania [140]. Zakres tych badań podają różne normy (np. [169–183, 187–189, 200–202]), zalecenia, (np. [206–208, 210–215]), instrukcje (np. [140, 216]), normy branżowe [168] i zakładowe warunki odbioru technicznego. Zakresy dopuszczalnych zmian parametrów są podawane najczęściej a priori przez konstruktora lub przyjmowane na podstawie wytycznych z norm albo opracowań innych producentów obrabiarek.

Z punktu widzenia producenta obrabiarek najistotniejsze są dwa aspekty badań [156]:

- potrzeba interpretacji wyników pomiarów z użyciem obiektywnych (niezależnych od wytwórcy) metod oceny w odniesieniu do istniejącego stanu techniki,
- możliwość wykorzystania pełnej mocy napędu głównego do skrawania, z zachowaniem warunków stabilnej pracy maszyny.

W pierwszym przypadku konieczna jest „normalizacja” wyników pomiarów i wprowadzenie pewnych wielkości odniesienia, aby możliwe było w ten sposób dokonywanie porównań obrabiarek różnych wielkości. W drugim, należy ograniczyć badania do możliwie małej liczby „reprezentatywnych” pomiarów, na podstawie których dokonana zostanie ocena obrabiarki.

2.2. BADANIA OBRABIARKI W STANIE SPOCZYNKU

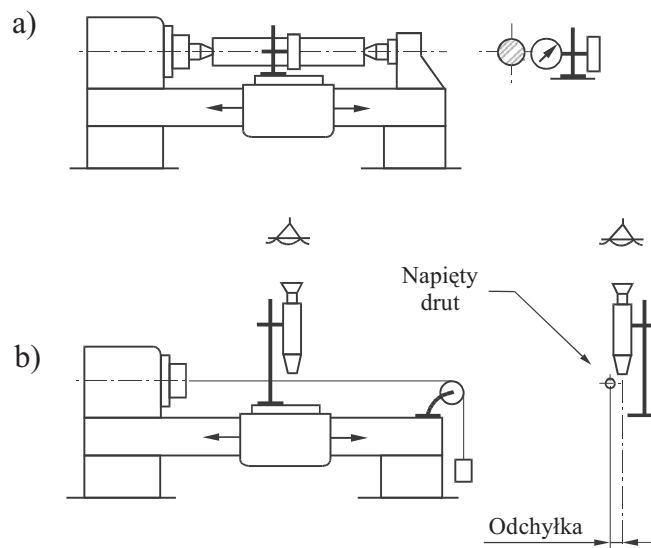
2.2.1. BADANIA DOKŁADNOŚCI GEOMETRYCZNEJ

Na odchyłki geometryczne obrabiarki składają się odchyłki kształtu i położenia pojedynczych elementów konstrukcyjnych (stoły, suporty, prowadnice, pinole) [156]. Spowodowane są one błędami wykonania elementów korpusowych i ich połączeń (prowadnice, ułożyskowania, połączenia stałe i zaciskowe), błędami montażowymi (np. luzy ustawcze w prowadnicach i łożyskach) oraz niedokładnościami wywołanymi zużyciem. Złe fundamentowanie i posadowienie maszyny mają także wpływ na błędy geometryczne. W przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie przyczyną odchyłek geometrycznych może być układ sterowania. Na odchyłki geometryczne wymiaru przedmiotu obrabianego mają także wpływ odchyłki od geometrii nominalnej narzędzia, odkształcenia sprężyste narzędzi, przedmiotów obrabianych, oprzyrządowania i elementów mocują-

cych, odchyłki uwarunkowane technologicznie (np. stopień krawędzi skrawającej). Ta ostatnia grupa odchyłek nie zależy jednak bezpośrednio od geometrii samej obrabiarki.

Badania dokładności geometrycznej obrabiarki w stanie spoczynku polegają na sprawdzaniu wymiarów, kształtu i położenia części składowych oraz ich wzajemnych przemieszczeń [187]. Dotyczą one tylko wymiarów i kształtów, które mogą wpływać na dokładność obrabiarki i dokładność obróbki. Pomiary geometryczne można również przeprowadzić na biegu jałowym [187]. Badania dokładności geometrycznej obrabiarki nie nastroją większych trudności bowiem zarówno w kraju [187–189, 201, 202], jak i za granicą [169–170, 174–183] są prawie całkowicie znormalizowane. Normy odnoszą się do różnych typów i odmian obrabiarek, podając dopuszczalne wartości najważniejszych dla danej maszyny odchyłek geometrycznych, jakie mogą wystąpić dla ustalonych warunków pomiaru. Wartości te są przyjęte a priori dla każdego rodzaju niedokładności geometrycznej (np. prostoliniowości, płaskości, równoległości, prostopadłości, bicia, okrągłości lub walcowości) i odnoszą się do całej przestrzeni roboczej. Na rysunku 2.2. przedstawiono przykładowo sposób sprawdzania prostoliniowości przesuwu suportu tokarki.

Na podstawie oceny dokładności geometrycznej przyjmuje się, że obrabiarka jest dobra albo zła. Ocena różnych obrabiarek tego samego typu jest możliwa przez porównanie zmierzonych lub wyznaczonych odchyłek rzeczywistych. Jednak odchyłki zwi-



Rys. 2.2. Sprawdzanie prostoliniowości przesuwu suportu tokarki:
(a) dla rozstawu kłków $DC < 1500$ mm, (b) dla dowolnej wartości DC [201]

Fig. 2.2. Checking of straightness of the lathe carriage movement:
(a) by the distance DC between centres $DC < 1500$ mm
(b) by another arbitrary value of DC [201]

zane z błędami geometrycznymi elementów obrabiarki, zmierzone w warunkach spoczynkowych w określonych miejscach przestrzeni roboczej, mogą w tych samych miejscach w warunkach ruchowych odzwierciedlać się na przedmiocie obrabianym w zupełnie inny sposób.

Pomiary dokładności geometrycznej mają najczęściej na celu wyznaczenie maksymalnej wartości odchyłki, związanej z danym rodzajem błędu, w całej przestrzeni roboczej lub w całym zakresie zmienności wymiarów badanych elementów. Maksymalne wartości odchyłki mogą występować w miejscach, w których bardzo rzadko, ze względu na zbiór wykonywanych operacji technologicznych, znajdują się elementy przesuwne obrabiarki. Wartości te są więc niemiernodajne ze względu na ocenę wykonania określonej maszyny. Dla położenia zespołów obrabiarki w miejscach, w których często wykonuje się operacje technologiczne, maszyna może okazać się dużo dokładniejsza, czasem nawet zbyt dokładna w stosunku do postawionych zadań obróbkowych. Ocenę dokładności geometrycznej obrabiarki należy powiązać ze spektrum operacji obróbkowych, które mają być wykonywane na danej maszynie. Należy brać pod uwagę odchyłki geometryczne wyznaczone dla takich konfiguracji struktury, jakie wystąpią w warunkach eksploatacji.

2.2.2. BADANIA WŁASNOŚCI STATYCZNYCH

Podstawą do oceny własności statycznych konstrukcji jest wpływ jej odkształceń, zachodzących pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych lub zastępczych, na względne przemieszczenia między przedmiotem i narzędziem. Na obciążenia obrabiarki składają się siły uogólnione pochodzące od procesu skrawania i od napędu oraz siły ciężkości i bezwładności. Cechą charakterystyczną obrabiarek jest to, że w warunkach eksploatacyjnych zmienia się ich struktura, położenie punktu zaczepienia wypadkowej siły skrawania, jej wartość i kierunek działania oraz wartość i kierunek sił od napędu. Wymaga to podjęcia podczas badań decyzji co do przyjęcia reprezentatywnych położzeń zespołów obrabiarki i reprezentatywnych warunków obciążenia. Przyjęty stan obciążenia układu (lub zbiór takich stanów) powinien dobrze modelować obciążenie, któremu podlegać będzie badany układ konstrukcyjny w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Powinien też być reprezentatywny dla wszystkich możliwych stanów obciążenia, jakie mogą wystąpić podczas realizacji zadań technologicznych.

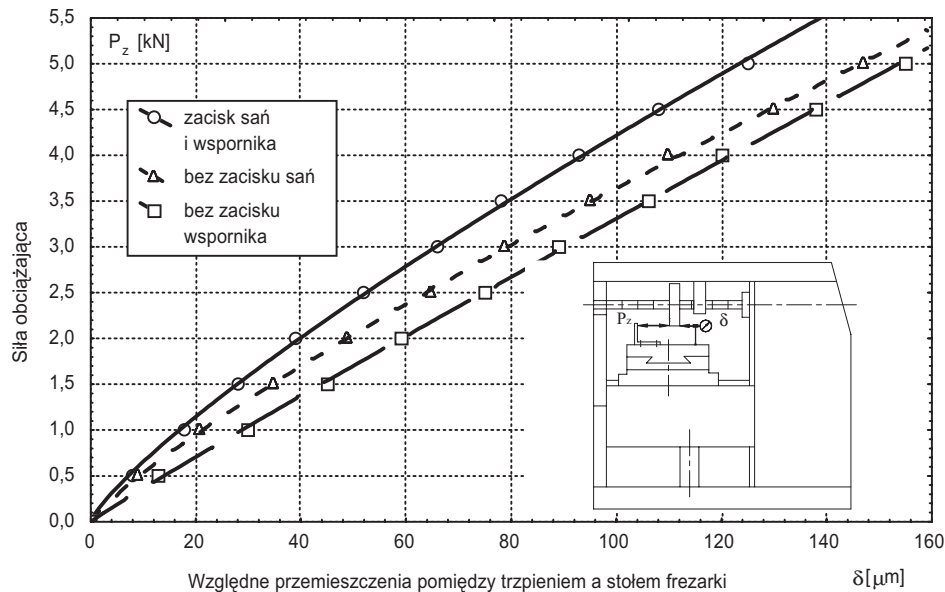
Badania własności statycznych obrabiarek nie są znormalizowane, ale spotykane są różne zalecenia, np. [140, 163, 168]. W większości spotykanych w literaturze metod tych badań obrabiarki są obciążane niezależnymi składowymi zastępczymi modelującymi wypadkową siłę skrawania. Wprowadza się przedmiot i narzędzie zastępcze, przez które wywierane jest obciążenie na układ nośny. Spotykane są również metody obciążania struktury ciężarem przedmiotu obrabianego i badania odkształceń układu dla różnych położzeń układu [171–173]. Przemieszczenia mierzy się w kierunkach zgodnych z kierunkami głównych składowych siły skrawania [140], przy czym jako kierunek podstawowy przyjmuje się ten, w którym przemieszczenia wywołują największe zmiany

wymiarów lub kształtu przedmiotu obrabianego. Charakterystyki statyczne wyznacza się również z użyciem tzw. obciążeń quasistatycznych [29], stosując technikę pomiaru i analizę drgań o częstotliwości rzędu kilku herców. Metoda wyznaczania charakterystyk statycznych wykorzystująca wymuszenia quasistatyczne jest obarczona jednak dużym błędem.

Badania statyczne mają na celu [140]:

- wyznaczenie sztywności statycznej niektórych zespołów obrabiarki i tzw. wskaźników sztywności sumarycznej,
- określenie wartości względnych przemieszczeń narzędzia i przedmiotu obrabianego (np. rys. 2.3) i oceny ich wpływu na dokładność obróbki.

Sztywność statyczną określa się na podstawie zmierzonych charakterystyk typu obciążenie–przemieszczenie. Są one również podstawą do szacowania nieliniowości układu. Ocena własności statycznych odbywa się na podstawie zaleceń zawartych w instrukcjach badań obrabiarek określonego rodzaju. Wyniki pomiarów porównuje się z rezultatami badań podobnych maszyn. Mogą być one wykorzystane do oceny sztywności dla różnych nastaw układu konstrukcyjnego maszyny (rys. 2.3). Niemiecka norma przejściowa [171], odnosząca się tylko do frezarek, proponuje cykl obciążanie–odciążanie maszyny w dwóch kierunkach (pchanie–ciągnięcie), przechodząc przez punkt zerowy obciążenia. W ten sposób można określić luzy i napięcie wstępne w łożyskach (czy jest



Rys. 2.3. Schemat obciążania frezarki i jej charakterystyki statyczne w zależności od różnych stanów zacisku zespołów przesuwnych

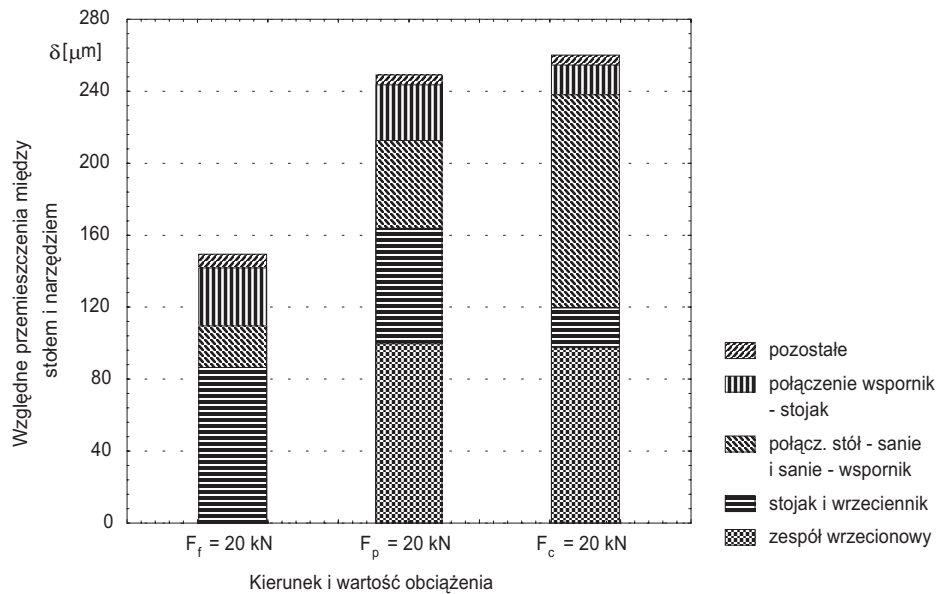
Fig. 2.3. Loading diagram of the milling machine and its static characteristics depending on different conditions of the sliding assemblies clamping

ono wystarczające). Dla wyznaczanych wskaźników sztywności brak jest jednak wartości odniesienia określających wartości dopuszczalne ze względu na planowane funkcje obrabiarki. W ograniczonym zakresie mogą one być stosowane jedynie do oceny porównawczej. Za odniesienie służą czasami wyniki badań prowadzonych od wielu lat z użyciem tej samej metody [156]. Zdaniem zespołu prowadzącego takie badania w Laboratorium Obrabiarkowym RWTH Aachen, wyznaczone w nich podatności statyczne mogą służyć za podstawę do oszacowania zwyczajowo występujących sztywności [156]. W pracy [65] przeprowadzono analizę podatności zespołu wrzecionowego poddanego różnym stanom obciążenia i wykazano, że stosowanie opisywanych w literaturze wskaźników sztywności jako kryterium może prowadzić nie tylko do błędnej oceny rozpatrywanych wariantów konstrukcyjnych tego zespołu, lecz także do błędnego oszacowania wpływu elementów składowych tego układu na jego zachowanie się w warunkach pracy.

Druga odmiana badań statycznych polega na ocenie względnych przemieszczeń zachodzących między narzędziem a przedmiotem obrabianym pod wpływem obciążeń roboczych na obrabiarkę pozostającej w stanie spoczynku lub w warunkach ruchowych. W pierwszym przypadku jako obciążenia stosuje się niezależne siły zastępcze modelujące poszczególne składowe wypadkowej siły skrawania. Zwykle nie są uwzględniane oddziaływania od napędu obrabiarki. Wyjątkiem jest metoda stosowana w pracy [65], w której obciążenie w strefie skrawania wywierane było za pośrednictwem układu napędowego. Badania statyczne obrabiarki podczas skrawania przeprowadza się, stosując rzeczywiste siły skrawania i siły od napędu, jakie występują dla zmieniających się parametrów obróbki. Podstawą oceny mogą być względne przemieszczenia między przedmiotem a narzędziem lub odchyłki od nominalnego wymiaru, spowodowane zmieniającymi się parametrami obróbki.

Badania unieruchomionej obrabiarki można łączyć z wielopunktowymi pomiarami przemieszczeń struktury nośnej maszyny. Wyniki badań mogą być wykorzystane do określenia słabych ogniw układu ze względu na jego własności statyczne. Wyznaczając udziały poszczególnych elementów układu konstrukcyjnego w całkowitym względnym przemieszczeniu między narzędziem i przedmiotem obrabianym (rys. 2.4), można wskazać na zespoły najbardziej podatne i tylko wśród nich przeprowadzać najbardziej efektywne zmiany konstrukcji. W tego typu badaniach często pomija się oddziaływanie narzędzia.

Kompleksową metodę oceny własności statycznych obrabiarek w połączeniu z metodą badań, kryteriami, wskaźnikami oceny i wartościami odniesienia opracowano w odniesieniu do tokarek [65]. Na podstawie badań statystycznego rozkładu powierzchni obrabianych można uwzględnić rzeczywisty rozkład obciążeń w przestrzeni roboczej oraz obciążenia pochodzące od siły napędowej. Opracowane wskaźniki są powiązane z klasą dokładności wykonania przedmiotu, a więc jednym z najważniejszych parametrów eksploatacyjnych obrabiarki. Przyjęte kryterium umożliwia dokonywanie ilościowej oceny własności statycznych tokarki ze względu na możliwą do uzyskania dokładność obróbki.



Rys. 2.4. Udziały różnych zespołów frezarki wspornikowej w całkowitym względnym przemieszczeniu między stołem i narzędziem, wywołanym różnymi składowymi siłami skrawania

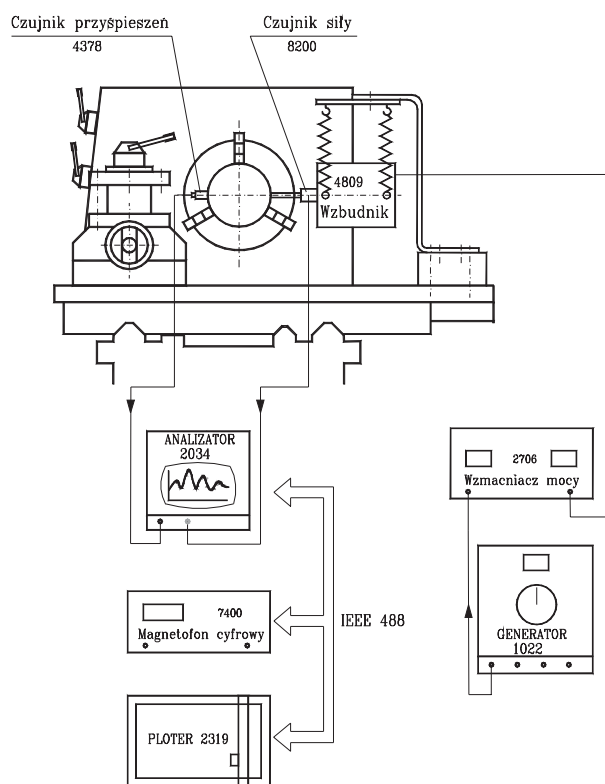
Fig. 2.4. Contribution of different assemblies of the knee-type milling machine to the total relative displacement between the table and the tool, due to various components of the cutting force

2.2.3. BADANIA WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH UKŁADU KONSTRUKCYJNEGO

Pomiary umożliwiające analizę i ocenę dynamicznych własności obrabiarek pozostałych w stanie spoczynku można podzielić na następujące grupy:

- wyznaczanie charakterystyk (funkcji przejścia) poszczególnych członów układu dynamicznego obrabiarki,
- analizę widmową sygnału otrzymanego z rejestracji drgań układu lub odpowiedzi układu na zadany sygnał wejściowy (wymuszenie),
- wyznaczanie postaci drgań,
- analizę modalną drgań układu.

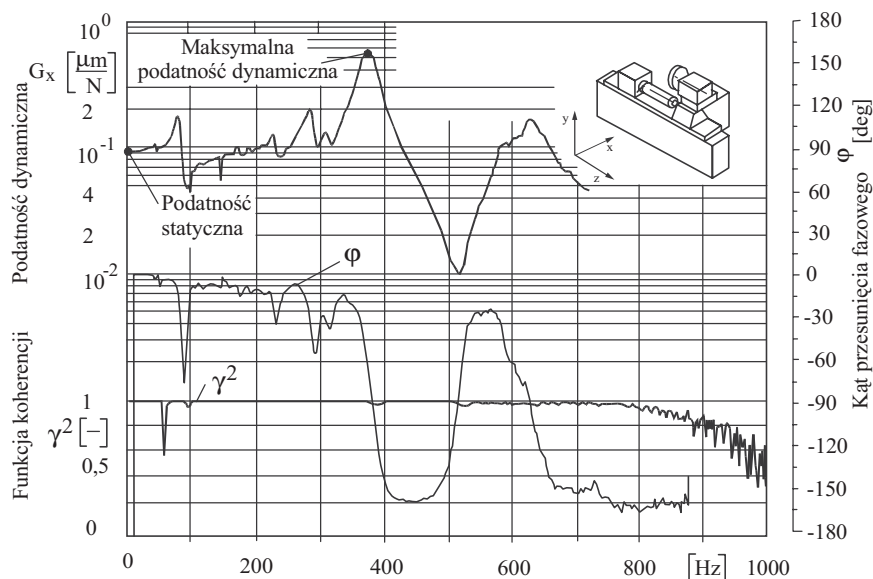
Funkcja przejścia układu przedstawiona jest w formie podatnościowej charakterystyki częstotliwościowej. Jej wyznaczenie wymaga wymuszenia drgań układu zmienną siłą oraz pomiaru amplitudy przemieszczenia i fazy, jako odpowiedzi na to wymuszenie (rys. 2.5). Zmienny sygnał elektryczny, o zadanym przebiegu czasowym, tworzony jest w generatorze, następnie wzmacniany i zadawany do wzбудnika, który wytwarza zmienną siłę oddziałującą na badany obiekt. Siła wymuszająca jest mierzona przez przetwornik umieszczony na elemencie łączącym wzbudnik z tym obiektem.



Rys. 2.5. Stanowisko badawcze do wyznaczania funkcji przejścia układu wrzecionowego tokarki
 Fig. 2.5. Experimental set-up for determining the transfer function of the lathe spindle system

Drgania układu mierzy się w ustalonych punktach za pomocą czujników generujących sygnały przyspieszenia, prędkości lub przemieszczenia. Sygnały z przetwornika siły oraz z czujników drgań są rejestrowane i następnie przetwarzane w zależności od potrzeb zastosowanej metody badań i oceny. W procesie przetwarzania stosuje się estymatory widma zależne od zastosowanego sygnału wymuszającego.

Analiza widmowa ma zastosowanie do drgań wymuszonych stochastycznymi lub aperiodycznymi (np. impulsowymi) sygnałami wymuszającymi. Spośród licznych, znanych metod analizy widmowej najczęściej jest obecnie stosowany cyfrowy algorytm szybkiej transformaty Fouriera, tzw. FFT. Odpowiedź układu na wymuszenie, zarejestrowana w dziedzinie czasowej, może być przetworzona na charakterystykę częstotliwościową (rys. 2.6) i za pomocą oprogramowania użytkowego przedstawiona w odpowiedniej formie (np. jako przebieg amplitudowy, fazowy lub w układzie biegunowym jako wykres amplitudowo-fazowo-częstotliwościowy) i zarchiwizowana. W przypadku obrabiarek metoda ta jest wykorzystywana do szybkiego wyznaczenia częstotliwości drgań własnych elementów i jest ściśle związana z wyznaczaniem postaci drgań własnych i analizą modalną.



Rys. 2.6. Charakterystyki dynamiczne szlifierki do wałków: podatność dynamiczna (funkcja przejścia układu) G_x , kąt przesunięcia fazowego φ i funkcja koherencji γ [156]

Fig. 2.6. Dynamic characteristics of the cylindrical grinder: dynamic compliance (transfer function of the system) G_x , phase shift angle φ and coherence function γ [156]

Analizę widmową można przeprowadzić w warunkach spoczynkowych obrabiarki z użyciem wymuszeń wzbudnikiem [5, 30, 31, 34, 59, 60, 93, 123, 133], młotkiem udarowym [152] lub z wymuszeniem wynikającym z realizowanego rzeczywistego procesu skrawania [14, 16, 22, 64, 67, 76, 81, 84, 89, 90, 95, 114, 125, 128, 132–134]. Uzyskana informacja ma charakter ilościowy, ale nie ma najczęściej bezpośredniego związku z właściwościami eksploatacyjnymi obrabiarki. Ocena wyznaczonych charakterystyk, zmierzająca do optymalnych decyzji w kierunku poprawy własności układu konstrukcyjnego, jest bardzo trudna. Możliwa jest do przeprowadzenia tylko przez bardzo doświadczonego konstruktora. Celem zmian parametrów konstrukcyjnych jest najczęściej zwiększenie częstotliwości rezonansowych tego układu i zmniejszenie amplitud drgań rezonansowych. Niekiedy stosuje się metody aktywnego tłumienia drgań [56], realizowane na istniejącej fizycznie konstrukcji. Metody te umożliwiają ograniczenie drgań maszyny, jednak bez ustalenia ich źródła.

Analiza modalna [4, 31, 34, 36, 48, 97, 122, 123] umożliwia wizualizację zmian odkształceń układu występujących podczas poszczególnych postaci drgań rezonansowych. Jest ona obecnie stosowana w badaniach dynamicznych u największych producentów obrabiarek. Wykorzystywana jest ona do ustalania słabych punktów struktury nośnej złożonych układów drgających [78, 79, 156]. Analiza ta wymaga jednak bardzo drogiego systemu pomiarowego i kosztownego oprogramowania, które umożliwi uzyskanie efektu animacji drgań modelu układu dynamicznego na bazie wprowadzonego

do systemu modelu geometrycznego struktury i wielopunktowego pomiaru charakterystyk dynamicznych. Analiza modalna umożliwia znalezienie tych elementów i zespołów obrabiarki, których drgania mają największy udział we względnych drganiach zachodzących między przedmiotem i narzędziem. Ze względu na powszechnie stosowane wymuszenia sygnałami stochastycznymi pomija się wszelkie nieliniowości układu dynamicznego, co jest słabym punktem tej metody.

Oprogramowanie do analizy modalnej ma moduły, które umożliwiają także dokonywanie modyfikacji modeli teoretycznych, zbudowanych na bazie elementów skończonych, w najbardziej rozpowszechnionych systemach obliczeniowych (np. ANSYS, COSMOS, PATRAN). Umożliwia to znaczne rozszerzenie możliwości analizy konstrukcji obrabiarki z wykorzystaniem zweryfikowanych doświadczalnie modeli obliczeniowych, co jest atutem tej metody. Ocena drgań obrabiarki ma charakter jakościowy i umożliwia podejmowanie efektywnych decyzji konstruktorskich (na podstawie lepszej informacji niż w przypadku analizy widmowej), zmierzających do poprawy własności dynamicznych układu.

W odniesieniu do obrabiarek stosuje się również analizę modalną, wykorzystującą jako wymuszenie stabilny proces obróbki [48, 122]. Realizowana jest ona pod obciążeniem roboczym, a nie w stanie spoczynku obrabiarki. Zaletą takiego sposobu wymuszeń jest zapewnienie rzeczywistych obciążeń struktury nośnej i zamknięcia pętli obciążeń przez sprzężenie układu procesem skrawania. Wadą natomiast jest zmienność układu dynamicznego obrabiarki podczas realizacji tego procesu. Wyniki takiej analizy modalnej należy więc interpretować z dużą ostrożnością.

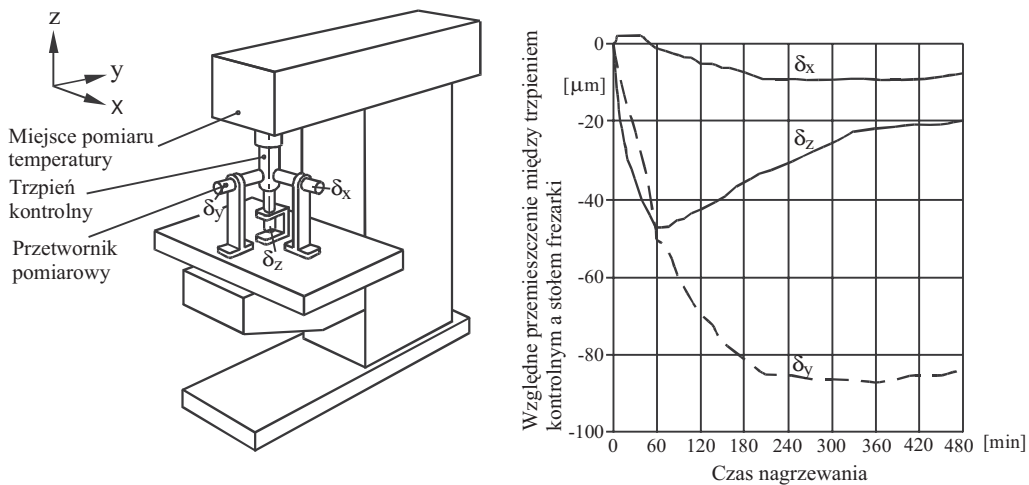
W przypadku badań własności dynamicznych obrabiarek pozostających w spoczynku, zasadnicze znaczenie ma przyjęta procedura pomiarowa. Składają się na nią: przyjęty sposób obciążenia układu (rodzaj zastosowanego wzbudnika drgań i miejsce jego przyłożenia, sygnał wymuszający wykorzystywany do pomiarów i jego amplituda, napięcie wstępne układu), reprezentatywne położenia elementów struktury układu, miejsca pomiaru drgań i sposób analizy wyników. „Przepisy” badania różnych typów obrabiarek (do stosowania w praktyce) podają materiały stowarzyszenia niemieckich producentów obrabiarek VDW [160]. Również i w tym przypadku autorzy nie podają kryteriów oceny wyników i wartości odniesienia do wyznaczanych charakterystyk. Istniejące normy i zalecenia dotyczące dopuszczalnych wartości amplitud drgań maszyn [191, 203, 204] nie odnoszą się do obrabiarek. Próba normalizacji dopuszczalnych wartości parametrów drgań wymuszonych obrabiarek [204] nie doczekała się realizacji.

2.3. BADANIA OBRABIARKI NA BIEGU JAŁOWYM

2.3.1. BADANIA WŁASNOŚCI CIEPLNYCH

Źródła ciepła w obrabiarce są związane z węzłami strat mocy w silnikach napędu głównego i posuwów, układach hydraulicznych, sprzęgłach, łożyskach i przekładniach oraz z realizowanym procesem skrawania. Na obrabiarkę oddziałują również zewne-

trzone źródła ciepła, do których zalicza się zmiany temperatury otoczenia, warstwowy rozkład temperatury w hali, przeciągi i promieniowanie słoneczne. Wymuszone tymi warunkami nagrzewanie obrabiarki zmienia przestrzenne pole izoterm struktury układu konstrukcyjnego i może w trakcie eksploatacji wywoływać znaczne jego odkształcenia, które w rezultacie prowadzą do zwiększenia względnych przemieszczeń między narzędziem i przedmiotem obrabianym (rys. 2.7). Przemieszczenia bezpośrednio powodują błędy obróbki, których udział w całkowitej odchyłce może sięgać nawet ponad 50% [8].

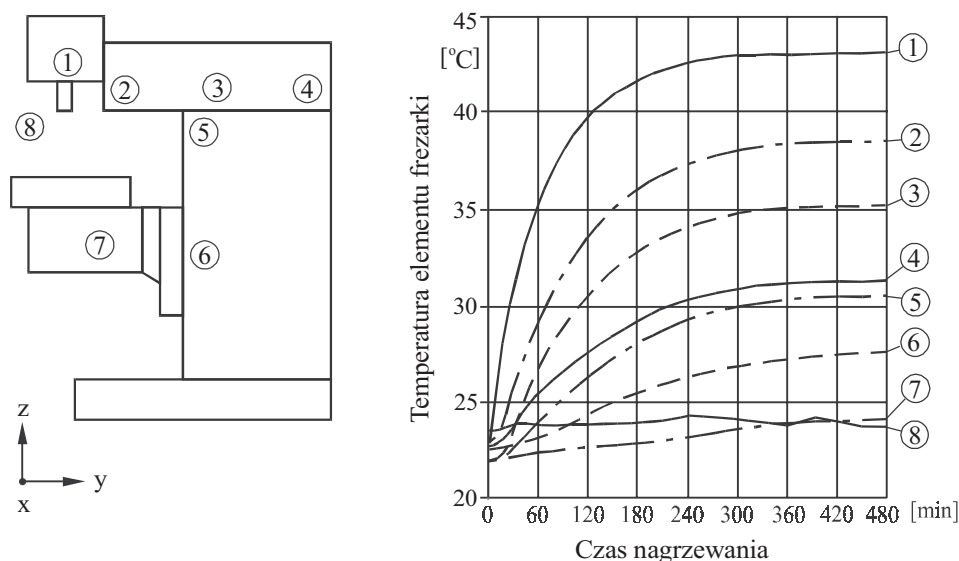


Rys. 2.7. Sposób i wyniki pomiaru względnych przemieszczeń cieplnych między trzpieniem kontrolnym i stołem frezarki [171]

Fig. 2.7. Method and results of measurements of the relative thermal displacements between the plunger and the table of the milling machine [171]

Własności cieplne układu konstrukcyjnego określa się zazwyczaj na biegu jałowym [57, 156, 171], z uwzględnieniem oddziaływania jedynie źródeł wewnętrznych. Na odkształcenia termiczne obrabiarki w warunkach eksploatacyjnych wpływają dodatkowo parametry procesu technologicznego, zależne od stawianych jej zadań obróbkowych. O nagrzewaniu i związanych z tym odkształceniach układu konstrukcyjnego decydują przede wszystkim prędkości obrotowe zespołów oraz wartości występujących obciążeń siłami skrawania i momentami napędowymi.

Istniejące niemieckie normy tymczasowe [171–173] określają zasady postępowania podczas badań, ale tylko w odniesieniu do frezarek, które są poddane obciążeniom statycznym i termicznym. Normy te nie podają jednak granicznych wartości odniesienia wyznaczanych parametrów. Otrzymane w wyniku tego typu badań charakterystyki względnych przemieszczeń między narzędziem a przedmiotem obrabianym (rys. 2.7), wywołanych nagrzewaniem się zespołów dla ustalonych cykli pracy obrabiarki (rys. 2.8),



Rys. 2.8. Miejsca pomiaru i zmiany temperatury nagrzewania elementów frezarki podczas pracy na biegu jałowym z prędkością obrotową wrzeciona $n = 0,75n_{\max}$ [171]

Fig. 2.8. Measurement points and changes of the heating temperature of the milling machine elements during idle running with spindle rotational speed $n = 0,75n_{\max}$ [171]

nadają się do przeprowadzenia analiz porównawczych frezarek tego samego rodzaju. W przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie są też wykorzystywane do zaprogramowania algorytmu korekcyjnych nastaw frezarki do kompensacji termicznych przemieszczeń.

Odkształcenia cieplne innych typów obrabiarek, np. tokarek sterowanych numerycznie, mogą być też określane pośrednio na podstawie pomiarów dokładności obróbki przedmiotów próbnych [200, 207] podczas prób pracą wykonanych w pewnym odstępie czasu. Wyniki tych pomiarów mogą być wykorzystane do wyprowadzenia empirycznych funkcji kompensacji, opracowania zasad symulacji numerycznej lub modeli uogólnionych służących do korygowania odkształceń cieplnych obrabiarki [8].

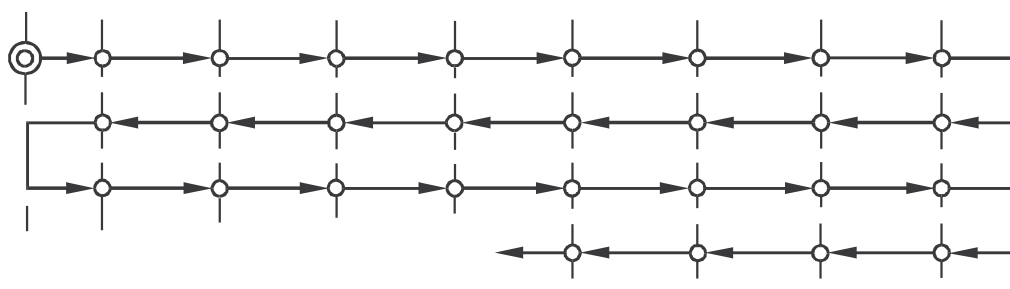
2.3.2. BADANIA BŁĘDÓW KINEMATYCZNYCH OBRABIARKI I POWTARZALNOŚCI POZYCJONOWANIA

Podczas obróbki na obrabiarkach skrawających na powierzchni przedmiotu obrabianego odzwierciedlają się błędy kinematyczne obrabiarki. Cechą charakterystyczną konstrukcji tych maszyn jest występowanie wielu funkcjonalnych, wzajemnie zależnych układów napędowych. Umożliwiają one realizację, podczas obróbki, odpowiednich sprzężeń ruchów zespołów przesuwnych i obrotowych (np. podczas gwintowania, sterowania kształtowego). Przyczyną odchyłek kinematycznych, odzwierciedlających się na przedmiocie obrobionym, są często oddziaływania odchyłek geometrycznych wy-

stępujących w elementach napędów, prowadnicach lub łożyskach. W przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie błędy kinematyczne są powodowane także przez statyczne i dynamiczne własności układów sterowania.

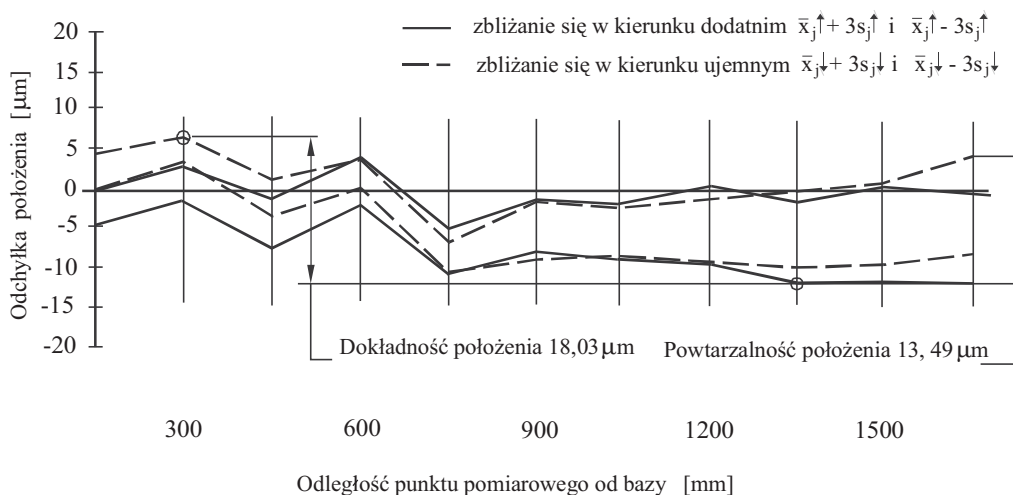
Błędy kinematyczne można wyznaczać na obrabiarce obciążonej pracą lub nieobciążonej, ale ze względu na problemy pomiarowe badania przeprowadza się częściej na biegu jałowym [156]. W celu wyznaczenia tych odchyłek dokonuje się pomiaru liniowych lub kątowych przemieszczeń zespołów, dla każdej napędzanej osi napędu posuwu, z możliwie dużą rozdzielczością i dokładnością. Do tego typu badań stosuje się najczęściej różnego typu przyrządy optyczne i laserowe. Wykorzystywane też są nowoczesne rozwiązania narzędzi pomiarowych, np. trójwymiarowe pręty teleskopowe [187].

Błędy pozycjonowania są miarą dokładności położenia, czyli statystycznie możliwych odchyłek położenia związanych z pracą napędu posuwu [151]. W obrabiarkach sterowanych numerycznie zależą one od rozdzielczości i dokładności układów pomiaru położenia, odkształceń elementów napędu, ciężaru własnego elementów, sił tarcia w połączeniach ruchowych, nastaw sterowania i regulatora. Badania dokładności pozycjonowania obrabiarek sterowanych numerycznie są znormalizowane i w Polsce obowiązuje norma [188], będąca tłumaczeniem normy ISO [177]. Niemieckie zalecenia [210] są nieco szersze, bo obejmują też statystyczne badania dokładności obróbki. Sprawdzanie dokładności pozycjonowania odbywa się według jednego z wybranych cykli pomiarowych [188] (np. rys. 2.9). Dla każdego nominalnego położenia zespołu dokonuje się pomiarów, a wyniki opracowuje się według podanej procedury statystycznej i przedstawia w postaci wykresu odchyłek (rys. 2.10). Dokładność pozycjonowania można też określać, uwzględniając długotrwały wpływ nagrzewania się obrabiarki. Ogólnie efektem badania dokładności pozycjonowania jest wyznaczenie parametrów dokładności i powtarzalności (por. rys. 2.10), ale wspomniana norma nie precyzuje kryteriów oceny i wartości dopuszczalnych tych parametrów. Wyniki mogą być zatem wykorzystane w badaniach porównawczych i do sterowania jakością produkcji u producenta obrabiarek.



Rys. 2.9. Cykl liniowy stosowany podczas testowania dokładności i powtarzalności pozycjonowania [188]

Fig. 2.9. Linear cycle used in the accuracy and repeatability tests [188]



Rys. 2.10. Jednokierunkowe odchyłki położenia i powtarzalność położenia zespołu przesuwnej obrabiarki podczas jego zbliżania się do ustalonego położenia w kierunku dodatnim i ujemnym względem kierunku osi [177]

Fig. 2.10. Unidirectional deviation of position and repeatability of position of the machine tool sliding assembly during its positive and negative approach to target positions relative to the axis direction [177]

Specjalną grupę błędów kinematycznych, które również rozstrzygają o osiągniętej dokładności obróbki, stanowią odchyłki położenia osi elementów wirujących obrabiarki. Występują one w odniesieniu do wrzecion, stołów obrotowych i różnych powierzchni ustalających, np. stożków centrujących uchwytu, powierzchni przylegania stołów obrotowych. Do pomiaru odchyłek położenia osi elementów wirujących stosuje się różne metody i narzędzia pomiarowe. Ich wybór zależy od rodzaju realizowanego procesu obróbki i związanych z nim tzw. „wrażliwych kierunków przemieszczeń” [156], tzn. tych kierunków, w których zmiany przemieszczeń najbardziej oddziałują na odchyłki wymiarów przedmiotu obrabianego. Są to najczęściej kierunki przemieszczeń prostopadłych do powierzchni obrabianej, występujących między wierzchołkiem narzędzia a tą powierzchnią. Przemieszczenia styczne nie mają znaczenia lub mają mały wpływ na uzyskiwaną dokładność. Stąd na przykład promieniowe odchyłki należy określać podczas wiercenia w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, a podczas toczenia wystarczy w jednym, zgodnym z działaniem składowej odporowej siły skrawania. Ze względu na złożoność błędów związanych z osiami elementów wirujących, odchyłki z nimi związane należy traktować indywidualnie, zależnie od rodzaju obrabiarki.

Dokładność napędu w obrabiarkach sterowanych numerycznie bada się również metodą pośrednią określając dokładność wykonania przedmiotu próbnego. Wpływ dynamiki napędu może być określany dla różnych prędkości posuwu, na podstawie pomiaru wymiarów charakterystycznych konturu tego przedmiotu [207]. Ścisłe wymiary

przedmiotu próbnego (zalecenia podają tylko część wymiarów), warunki technologiczne prób pracą, metodę i środki pomiarowe oraz dopuszczalne odchyłki ustala jednak użytkownik w porozumieniu z producentem maszyny. Dokładność odtworzenia zadanego konturu jest rozstrzygającym kryterium oceny dla precyzyjnych obrabiarek NC [151].

2.4. BADANIA OBRABIARKI POD OBCIĄŻENIEM ROBOCZYM

Obciążenia obrabiarki mogą być realizowane rzeczywistymi siłami skrawania w warunkach ruchowych poszczególnych zespołów. Testy obróbkowe są odmianą badań pośrednich, w których obrabiarka jest oceniana ze względu na odporność na utratę stabilności i osiąganą dokładność obróbki. Badania pracą obejmują obróbkę próbek zgodnie z podstawowym zakresem prac i przeznaczeniem obrabiarki, dla wstępnie ustalonych ograniczeń i tolerancji [170, 176, 187]. Przeprowadza się je z użyciem przedmiotów próbnych dostarczonych przez użytkownika, których wymiary i wymagania dotyczące dokładności obróbki są określone często przez normy dotyczące badań określonych typów obrabiarek. Materiał i parametry skrawania są ustalane w wyniku uzgodnień między użytkownikiem i producentem [187]. Na specjalne życzenie użytkownika stosuje się też inne niż ujęte w normach wymiary próbek i wymagania żądanej dokładności. Nie zawsze jest możliwe i konieczne przeprowadzenie wszystkich badań określonych w normie. Badania, które należy przeprowadzić [179], ustala użytkownik w porozumieniu z producentem. Z jednej strony trudno takie rozwiązanie uznać za obiektywne, a z drugiej to właśnie użytkownik narzuca swoje wymagania wytwórcy i od niego zależą obecnie kryteria i wskaźniki oceny obrabiarki.

2.4.1. BADANIA STABILNOŚCI

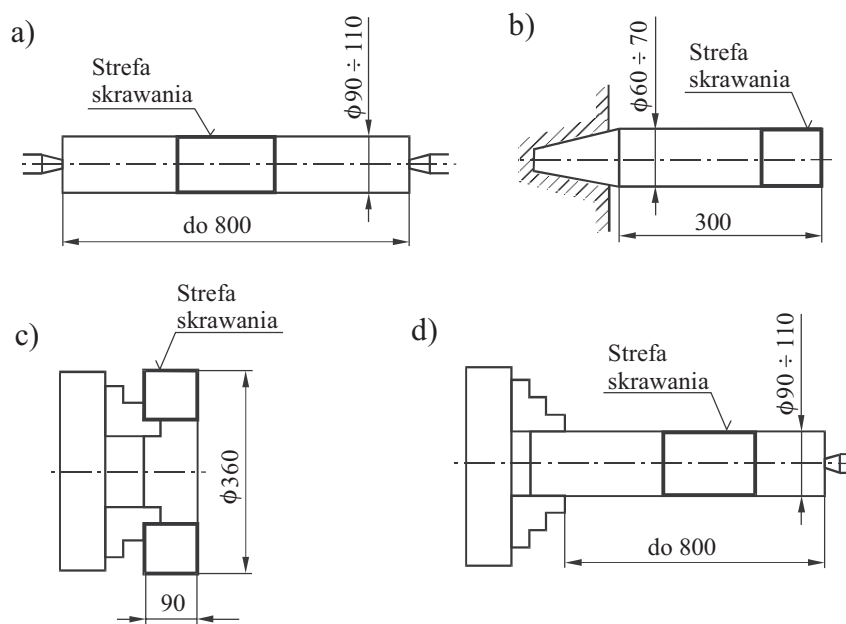
Zagadnienie stabilności procesu skrawania na obrabiarence jest przedmiotem wielu prac (np. [6, 27, 28, 33, 60, 74, 86, 87, 89, 95, 114, 115, 117, 141, 143, 145–147, 164]). Niestabilność stanowi często główną przeszkodę w wykorzystaniu pełnej mocy napędu. Odporność na powstawanie drgań samowzbudnych, tzw. wibrostabilność, łączy się bezpośrednio z oceną układu masowo-dysypatywno-sprężystego maszyny [144]. Zależy ona od wielu czynników związanych z obrabiarką, narzędziem, przedmiotem obrabianym i procesem skrawania. Z jednej strony ta wielorakość zależności ogranicza zakres stosowania testów obróbkowych [154] do obrabiarek zadaniowych i specjalnych, a z drugiej czyni sensownymi wszelkiego rodzaju symulacje. Wartości parametrów strukturalnych opisujących modele obliczeniowe wyznaczone na podstawie danych literaturowych, mogą być jednak w znacznym stopniu niepewne, powodując duże błędy obliczeń [144]. Niedoskonałość z kolei metod modelowania, a co za tym idzie komputerowych prognoz wibrostabilności, powoduje konieczność ich doświadczalnej weryfikacji [144]. Jest ona tym bardziej celowa, że nawet obrabiarki tego samego typu, wyprodukowane w jednej serii, znacznie różnią się własnościami dynamicznymi [154].

Stabilność układu dynamicznego obrabiarki powinna być badana i oceniana niezależnie od własności jej układu konstrukcyjnego [65], gdyż nie można ustalić jednoznacznego związku między charakterystykami dynamicznymi a granicą stabilności [156]. Wymagania związane z dokładnością obróbki ograniczają zakres możliwych zmian konstrukcyjnych zmierzających do zwiększenia granicy stabilności układu. Nie można zwiększać stabilności kosztem zmniejszenia dokładności obróbki, bo prowadzi to do zmniejszenia wydajności obrabiarki w całym zakresie zastosowań. Drgania samowzbudne ograniczają wydajność jedynie w pewnym zakresie parametrów obróbki, więc bardziej celowe wydaje się podjęcie różnych przedsięwzięć związanych z takimi zmianami tych parametrów, aby umożliwić pracę obrabiarki w stabilnym zakresie. Niespełnienie wymagań dotyczących stabilności pracy dyskwalifikuje konstrukcję i wymaga jej analizy w celu znalezienia słabych ogniw struktury [78, 79, 144, 156]. Do tego są wykorzystywane m.in. metody analizy modalnej [31, 34, 36, 48, 97, 122, 123].

Celem badań stabilności jest wyznaczenie granicznych wartości parametrów skrawania, przy których powstają drgania samowzbudne. Granicę stabilności wyznacza się podczas obróbki typowych, dla badanej obrabiarki, przedmiotów, z zastosowaniem typowych operacji technologicznych, typowych materiałów obrabianych, narzędzi i uchwytów [140]. Jednoczesny pomiar mocy pobieranej przez silnik napędu głównego umożliwia ocenę stopnia jej wykorzystania dla różnych warunków obróbki w zakresie stabilnej pracy obrabiarki. Brak jest w tej dziedzinie unormowań o zasięgu krajowym, lecz istnieje wiele zaleceń branżowych lub zakładowych, podających warunki przeprowadzenia badań.

Testy obróbkowe są wykonywane głównie podczas badań odbiorczych, według specjalnych procedur, które ustalają materiał i kształt próbek, warunki ich mocowania (np. rys. 2.11), rodzaj i geometrię narzędzia oraz sposób jego mocowania, parametry obróbki i sposób przeprowadzenia badań. W ramach testów stabilności przeprowadza się skrawanie przedmiotów próbnych, zmieniając stopniowo (zazwyczaj zwiększając) zmienny parametr skrawania (najczęściej głębokość skrawania albo szerokość warstwy skrawanej), aż do momentu powstania drgań samowzbudnych lub do osiągnięcia parametrów odpowiadających wykorzystaniu pełnej mocy silnika napędowego [140]. Próby prowadzi się zmieniając skokowo pozostałe parametry skrawania w zakresie wartości, zwykle używanych dla danego typu obrabiarki. Utrata stabilności łączy się z dużym zwiększeniem chropowatości powierzchni obrabianej, efektami akustycznymi, falistością i chropowatością spływającego wióra [85]. Mimo znacznego błędu, jaki można popełnić w ocenie granicznych wartości parametrów skrawania na podstawie wspomnianych objawów, metoda ta jest często i chętnie stosowana w warunkach przemysłowych [85].

Efektem przeprowadzonych testów obróbkowych jest karta stabilności obrabiarki (rys. 2.12). Należy zwrócić uwagę, że jest ona wyznaczana dla wybranych dwóch parametrów skrawania. Pozostałe parametry oraz materiał obrabiany i narzędzie pozostają niezmiennie. Uwzględnienie innych czynników wymaga przeprowadzenia kosztownych badań doświadczalnych, w związku z tym podczas badań odbiorczych obrabiarek przyjmuje się, zarówno materiał i kształt próbek, jak i narzędzie i parametry obróbki,



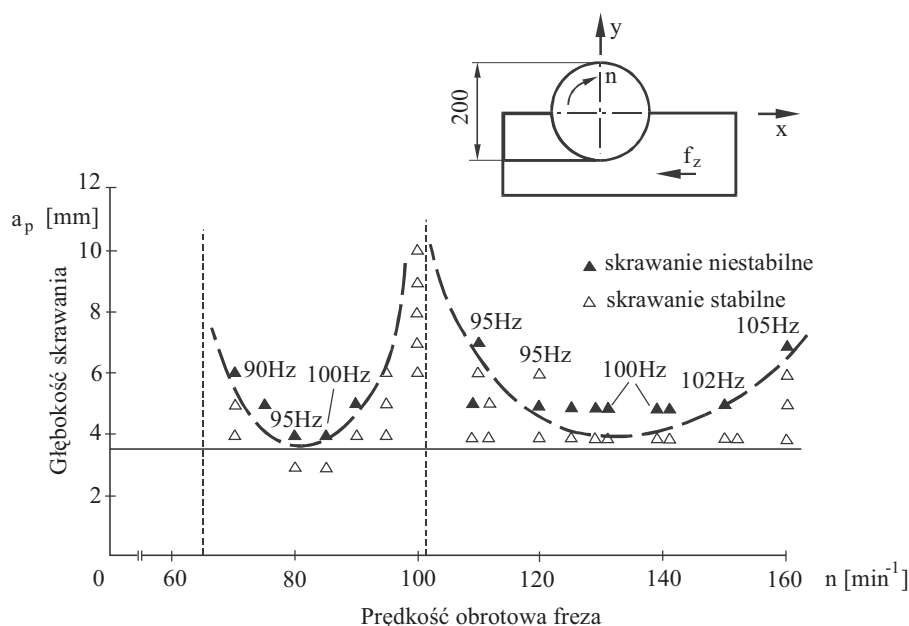
Rys. 2.11. Próbkki do badania stabilności układu OUPN podczas toczenia, zalecane przez ENIMS (cyt. za [85])

Fig. 2.11. Test pieces for checking the lathe system stability under turning recommended by ENIMS (after [85])

w uzgodnieniu z przyszłym użytkownikiem. Szersze testy tego typu prowadzi się jedynie podczas badań prototypu, jakkolwiek, ze względu na dużą liczbę możliwych wariantów obróbki (różne narzędzia, materiały i kształty próbek, różnorodność wzajemnych położeń zespołów obrabiarki), zastępuje się je analizami obliczeniowymi. W dążeniu do ograniczenia tych wariantów ustala się reprezentatywne stany obciążenia układu i konfiguracje struktury oraz przyjmuje reprezentatywny materiał, narzędzie i parametry obróbki.

Określenie granicznych, ze względu na stabilność, wartości parametrów skrawania umożliwia ocenę odporności układu konstrukcyjnego obrabiarki na drgania samowzbudne. Nie daje jednak bezpośrednich informacji o dokonanie konkretnych zmianach konstrukcyjnych, umożliwiających poprawę tej odporności [85]. Dopiero analiza widma i postaci drgań (gdy następuje utrata stabilności) stwarza możliwość znalezienia słabo ogniwa w układzie dynamicznym obrabiarki, czyli elementu, którego udział we względnych drganiach między przedmiotem i narzędziem jest największy. Ujawnienie tego ogniwa może być podstawą do sformułowania odpowiednich zaleceń konstrukcyjnych.

Podstawą do oceny zakresu możliwości obróbczych są wytyczne producenta (najczęściej narzucone przez konstruktora, np. dopuszczalne wartości amplitud przemie-



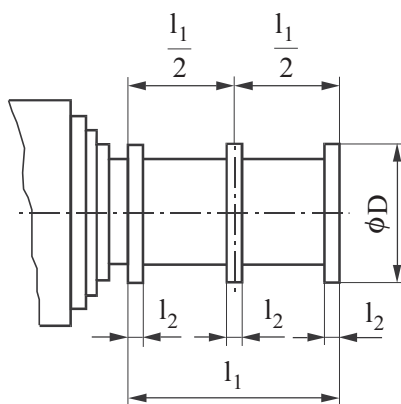
Rys. 2.12. Karta stabilności frezarki uzyskana na podstawie testów obróbkowych [156]

Fig. 2.12. Milling machine stability chart obtained from cutting tests [156]

szczeń [164]) lub wyniki badań obrabiarek podobnego typu i wielkości. Brak jest kryteriów oceny (nie jest ściśle zdefiniowany moment utraty stabilności) i wartości odniesienia. Efektem badań może być wprowadzenie zaleceń technologicznych (w przypadku badań odbiorczych) lub konstrukcyjnych (w badaniach prototypu).

2.4.2. BADANIA PRACĄ I OKREŚLANIE MOŻLIWOŚCI TECHNOLOGICZNYCH

Normy ustalające ogólne wytyczne badań odbiorczych obrabiarek [170, 176, 187], zagadnienie badań pracą traktują marginalnie. Uszczegółowienie badań występuje dopiero w normach przedmiotowych dotyczących konkretnych rodzajów obrabiarek (np. [174, 175, 178–183, 201, 202]). Normy podają zasady przyjmowania kształtu przedmiotu obrabianego, np. rys. 2.13, jego zamocowania, rodzaje operacji technologicznych i dopuszczalne odchyłki wyznaczanych parametrów dokładności wykonania. Zaleca się, aby badania pracą wykonane były podczas obróbki wykańczającej, a nie podczas obróbki zgrubnej, podczas której występują duże siły skrawania. Kształt i wymiary przedmiotu obrabianego nie mają związku z rozkładem spektrum przedmiotów, które będą wykonywane na danej obrabiarence. Dobierane są w zależności od typu i wielkości badanej obrabiarki.



Rys. 2.13. Przykład kształtu próbnego przedmiotu obrabianego stosowanego w badaniach pracą tokarek i do oceny dokładności wykonania (przy czym: $D > D_d/8$, $l_1 = 0,5D$, $l_{1\max} = 500$ mm, $l_{2\max} = 20$ mm) [179, 201]

Fig. 2.13. Example of the test piece shape used in machining tests of the lathes and in assessment of the machining accuracy, where: $D > D_d/8$, $l_1 = 0,5D$, $l_{1\max} = 500$ mm, $l_{2\max} = 20$ mm [179,201]

Wraz ze wzrostem znaczenia statystycznego procesu regulacji jakości wprowadzona została metoda badania możliwości technologicznych obrabiarek (niem. Fähigkeitsuntersuchungen – dosł. tłum. badania zdolności) [153, 158], która jest związana z określeniem niezawodności maszyny i realizowanego procesu. Autorzy tej metody stwierdzili, że w tym zakresie brak jest norm i zaleceń, które byłyby niezależne od producenta. Opracowali więc metodę, która przez obróbkę 50 próbnych przedmiotów oraz ich pomiar i analizę statystyczną wymiarów, umożliwia dokonanie oceny dokładności roboczej obrabiarki, uwzględniając nie tylko własności maszyny, lecz także materiał, warunki procesu skrawania i obsługi (rys. 2.14). Badania te są zalecane tylko w stosunku do obrabiarek, które używa się do produkcji wielkoseryjnej lub masowej [158]. Możliwości technologiczne są więc określane jako zdolność maszyny wytwórczej do wytwarzania w produkcji wielkoseryjnej i masowej przedmiotów, z zachowaniem zdefiniowanej tolerancji wykonania, ze statystycznie wykazaną pewnością [157].

W badaniach możliwości technologicznych bardzo duże znaczenie ma ustalenie wpływu trendu (np. odkształceń termicznych, zużycia narzędzia) na odchylenie standardowe mierzonych wymiarów i jego eliminacja przez dokonanie odpowiedniej poprawki zmierzonych wartości. Na podstawie obliczonych średnich arytmetycznych i odchylenia standardowego s skorygowanych danych pomiarowych wyznaczane są wskaźnik możliwości technologicznych obrabiarki i krytyczny wskaźnik możliwości technologicznych obrabiarki:

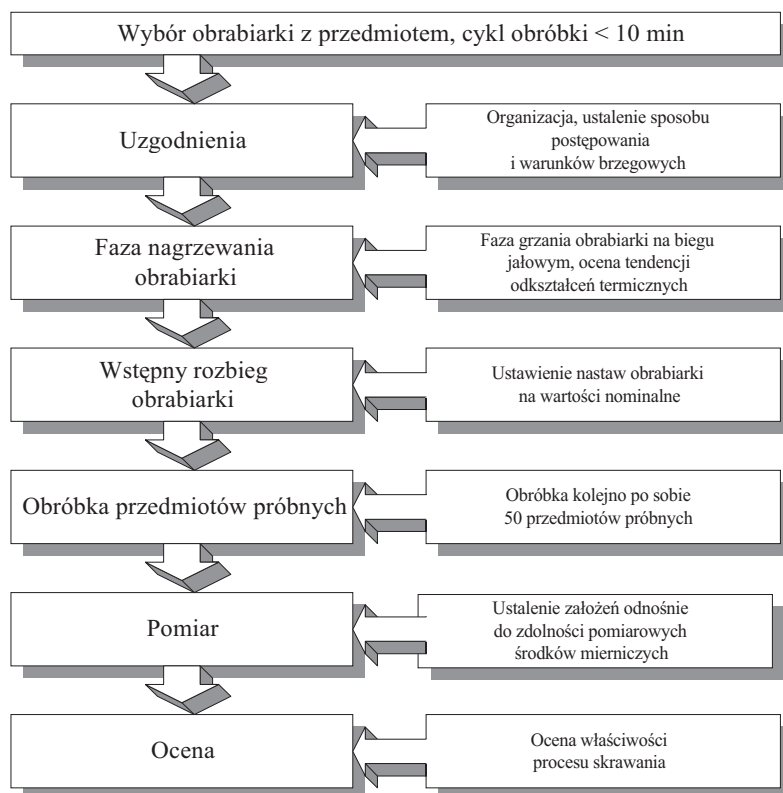
$$c_m = \frac{B - A}{6s} = \frac{T}{6s} \quad (2.1)$$

gdzie: B – górna granica tolerancji wymiaru,
 A – dolna granica tolerancji wymiaru,
 T – tolerancja wymiaru,
 s – odchylenie standardowe zmierzonych wymiarów.

$$c_{mk} = \min \left\{ \frac{B - \bar{x}}{3s}, \frac{\bar{x} - A}{3s} \right\} \quad (2.2)$$

gdzie: \bar{x} – średnia arytmetyczna zmierzonych wymiarów.

Wskaźnik c_m charakteryzuje naturalne możliwości obrabiarki (rozrzut) i nie mówi nic o tym, ile wartości pomiarowych leży w polu tolerancji, ponieważ ich rozkład może być niesymetryczny. Wskaźnik krytyczny c_{mk} określa zaś zarówno rozrzut, jak i prawidłowość ustawienia maszyny w stosunku do środka pola tolerancji [51]. Większe wartości wskaźników odpowiadają większym możliwościom technologicznym obrabiarki. Minimalna wartość wskaźników wynosi 1,33 [153]. Jeśli średnia arytmetyczna zmierzonych wymiarów leży w środku pola tolerancji, to oba wskaźniki przyjmują jedna-



Rys. 2.14. Przebieg badań możliwości technologicznych obrabiarki [159]

Fig. 2.14. Course of the production capacity tests of machine tools [159]

kowe wartości. Jeśli zaś wartość średnia przesunie się w stosunku do środka tego pola (np. wskutek zużycia narzędzia lub odkształceń cieplnych obrabiarki), to zostanie znacząco ograniczona dopuszczalna szerokość rozrzutu.

W badaniach możliwości technologicznych obrabiarki istnieje niebezpieczeństwo, że błędy pomiaru będą zinterpretowane jako błędy wykonania przedmiotu obrabianego i zostanie niewłaściwie oceniona dokładność pracy obrabiarki. Dlatego wymaga się, aby odchylenie standardowe środków pomiarowych s_{pom} było znacznie mniejsze od minimalnej tolerancji T_{min} mierzonej wielkości ($6s_{\text{pom}} \geq 0,15T_{\text{min}}$) [158]. Nie bez znaczenia jest też wybór odpowiedniej strategii pomiarów, która może wpływać na ocenę w pośrednich badaniach obrabiarek. Szczególny problem występuje podczas określania tolerancji kształtu [158], dlatego też często pojawia się pytanie o sensowność stosowania w badaniach możliwości technologicznych uśrednionych parametrów opisu topografii powierzchni obrobionej.

Konsekwencją tej, danej statystycznie, niepewności przy wyznaczaniu, w trakcie badań odbiorczych obrabiarek, ich możliwości technologicznych jest z jednej strony zrozumienie faktu, że niezbyt sensowne jest upieranie się przy ścisłym dotrzymywaniu założonej wartości wskaźnika możliwości technologicznych, z drugiej zaś, że wytwórca obrabiarki winien zakładać tak dużą, jak to tylko jest możliwe, wartość pewności, aby nawet w „przypadkowo” niekorzystnym wypadku pozytywnie przejść badania odbiorcze [158]. Takie podejście autorów metody badania możliwości technologicznych obrabiarek do „przypadkowo niekorzystnych” wyników pomiarów stawia pod znakiem zapytania pewność tej metody w odniesieniu do oceny obrabiarek. Dla pomyślnego przeprowadzenia badań odbiorczych ważniejszy byłby, zdaniem tych autorów, dobór optymalnej wartości wskaźnika możliwości technologicznych niż jego rzeczywista wartość.

2.5. PRZYDATNOŚĆ ISTNIEJĄCYCH RODZAJÓW BADAŃ DO OCENY WŁASNOŚCI OBRABIAREK

Na podstawie dokonanego przeglądu, stosowanych w praktyce przemysłowej i laboratoryjnej, badań własności i walorów eksploatacyjnych obrabiarek stwierdzić można, że tylko częściowo objęte są one niezależnymi od producentów normami i zaleceniami (tab. 2.1). Normy te obejmują przede wszystkim badania odbiorcze, w których pewne warunki wymagają uściślenia w porozumieniu z użytkownikiem, gdyż często zalecenia są błędne [157]. Zawarte w tabeli 2.1 dane nie obejmują wielu norm szczegółowych odnoszących się do konkretnych odmian obrabiarek, zwłaszcza w zakresie badania ich dokładności geometrycznej. Badania prototypów są prowadzone zazwyczaj według wytycznych konstruktora, producenta lub stowarzyszeń producentów obrabiarek. Obejmują one fazę powstawania konstrukcji, do której użytkownik nie ma jeszcze dostępu. Nie są objęte normami o charakterze państwowym lub szerszym – regionalnym. Zakres tych badań ustala zazwyczaj producent i nie są one na ogół ujawniane użytkownikom obrabiarki.

Tabela 2.1. Zakres unormowań w dziedzinie badań obrabiarek
Table 2.1. Standardization level in the machine tool tests

Lp.	Rodzaj badań	Zakres badań	Normy i wytyczne
1	Badania dokładności geometrycznej	Pomiary geometrii obrabiarki: odchyłki prostoliniowości, płaskości, równoległości, prostopadłości, bicia, okrągłości, walcowości, błędy podziału	PN-ISO 230-1 [187] ISO 230/1 [176] DIN 8601 [170] + normy szczegółowe
2	Badania własności statycznych	Podatność statyczna frezarek obciążonych siłami zastępczymi i ciężarem własnym przedmiotu	DIN V 8602 Teil 1-3 [171-173]
3	Badania własności dynamicznych	Pomiar drgań w określonych punktach struktury nośnej	Projekt normy PN-86/M-... [204]
4	Badania własności cieplnych	Termosprężyste odkształcenia frezarek w zdefiniowanych warunkach	DIN V 8602 Teil 1-3 [171-173]
5	Badania napędu i powtarzalności pozycjonowania	Wyznaczanie niedokładności pozycjonowania i odchyłek pozycjonowania, strefy nieczułości i szerokości rozrzutu oraz statystyczna ocena	PN-ISO 230-2 [188] ISO 230-2 [177] VDI/DGQ 3441 [210]
6	Badania pracą	Zasady przeprowadzania badań pracą, obróbka przedmiotów próbnych o różnej geometrii i statystyczna ocena dokładności wykonania	PN-ISO 230-1 [187] PN-86/M-55552 [200] VDI 2851 [207-208] VDI/DGQ 3441-3445 [210-215]
7	Badania specjalne	Zasady i warunki przeprowadzania badań możliwości technologicznych obrabiarek i statystyczne metody oceny	VDMA-Einheitsblatt [215] cyt. za [158]

Badania bezpośrednie obrabiarek dostarczają lepszych informacji o obiekcie, gdyż zapewniają najlepsze możliwości obiektywnej oceny, dzięki wykluczeniu wpływu na pomiary większości czynników zewnętrznych i dostarczeniu zaleceń do poprawy konstrukcji. Wadą ich jest jednak to, że są związane zwykle z dużymi nakładami narzędziowymi i czasowymi. Często też nie jest możliwe bezpośrednie przeniesienie wyników tych badań na konkretne zadania wytwórcze i związane z nimi obciążenia obrabiarki. Z tych względów w badaniach odbiorczych znalazły zastosowanie testy obróbkowe. Testy te należą do grupy badań pośrednich, w których nakłady są znacznie mniejsze i nie jest wymagana dodatkowa specjalistyczna aparatura pomiarowa, dlatego tego typu badania nadają się do wprowadzenia podczas produkcji obrabiarek do sprawdzania powtarzalności procesu technologicznego. Ze względu na sumaryczne oddziaływanie błędów na dokładność obróbki, „nie jest prawie możliwe wnioskowanie o wywołujących je elementach konstrukcyjnych obrabiarki” [158]. Wynik pomia-

rów jest oprócz tego silnie zależny zarówno od warunków brzegowych prowadzonych badań, jak i od parametrów obróbki.

W większości przedstawionych rodzajów badań obrabiarek skrawających wyniki są prezentowane za pomocą wielkości fizycznych, które nie mają wartości odniesienia. Służyć więc mogą jedynie do ocen jakościowych i porównawczych. Kryteria oceny obrabiarki narzuca producent lub ustala je w porozumieniu z użytkownikiem. W niektórych przypadkach podane są, niezależne od producenta, wartości graniczne parametrów (pomiary dokładności geometrycznej), ale nie mają one bezpośredniego związku z uzyskiwaną, w trakcie obróbki, klasą dokładności wykonania przedmiotu obrabianego. Brak jest kryteriów i wskaźników oceny własności, które uwzględniają dokładność obróbki.

W pracy podjęto próbę ustalenia takich kryteriów oceny obrabiarek, które, będąc niezależne od konstruktora i producenta, umożliwiłyby dokonanie obiektywnej oceny własności tego typu maszyn.

3. CEL I ZAŁOŻENIA PRACY

Z przeglądu różnych rodzajów badań obrabiarek, stosowanych w praktyce przemysłowej i laboratoryjnej, wynika konkluzja, że obecnie brak jest efektywnych metod umożliwiających jednoznaczną ocenę własności układu konstrukcyjnego obrabiarki. Wynika to z jednej strony z braku odpowiednich kryteriów oceny i konkretnych wartości odniesienia, a z drugiej z braku pełnej wiedzy na temat związków między własnościami obrabiarki a podstawowymi funkcjami użytkowymi. Podczas badań obrabiarek ocena wyznaczonych parametrów przeprowadzona jest najczęściej na podstawie przyjętych a priori, przez konstruktora lub użytkownika, wskaźników lub parametrów odniesienia. Nie istnieją też niezależne od producenta lub użytkownika metody oceny obrabiarek, dokonywane na podstawie planowanego zakresu zastosowań tych maszyn.

Celem rozprawy była próba opracowania metody kompleksowej oceny własności układów konstrukcyjnych obrabiarek i ich walorów eksploatacyjnych, na podstawie badań efektów obróbki przedmiotów próbnych i z uwzględnieniem stawianych maszynie zadań technologicznych.

W pracy przyjęto założenia:

- obciążanie obrabiarki powinno odpowiadać warunkom obróbki wykańczającej, z zapewnieniem stabilności procesu skrawania,
- różne położenia zespołów roboczych i odpowiadające im stany obciążenia obrabiarki powinny odpowiadać stawianym maszynie zadaniom technologicznym,
- wskaźnik oceny obrabiarki powinien uwzględniać związek między ocenianymi własnościami układu konstrukcyjnego a walorami eksploatacyjnymi konstruowanej obrabiarki, wyrażonymi dokładnością obróbki przedmiotu próbnego,
- wskaźnik oceny powinien umożliwiać dokonywanie zarówno całościowej, jak i częściowej oceny własności i wybranych walorów eksploatacyjnych obrabiarki,
- wskaźnik oceny powinien stwarzać możliwość porównywania jego wartości z przejrzystymi wartościami odniesienia.

Niezbędne do realizacji postawionego celu prace obejmowały:

- przeprowadzenie analizy wpływu własności obrabiarki i procesu skrawania na dokładność wymiarowo-kształtową i jakość powierzchni obrobionego przedmiotu,
- sformułowanie założeń do metody kompleksowej oceny obrabiarek,
- opracowanie kryteriów i wskaźników oceny własności obrabiarek, przydatnych podczas badań prototypów i badań odbiorczych,

- opracowanie ogólnych wytycznych do wyznaczania wskaźników oceny,
- weryfikację metody oceny na przykładzie wybranej obrabiarki.

Ze względu na fundamentalne znaczenie i częste występowanie w pracy, w różnych kontekstach, pojęcia **własności**, uściślono jego zakres znaczeniowy. Pojęcie **własności układu konstrukcyjnego obrabiarki** ograniczone zostało w całej pracy do odkształcalności tego układu, której charakter zależy od rodzaju działających na maszynę obciążeń. Odzwierciedleniem własności statycznych są odkształcenia układu konstrukcyjnego pod wpływem stałych sił uogólnionych nie zmieniających się w czasie, pochodzących z procesu skrawania, napędu i ciężaru własnego elementów. **Własności dynamiczne** znajdują swój wyraz w odkształcalności układu w wyniku zmieniających się w czasie sił uogólnionych, pochodzących od procesu skrawania i napędu oraz związanych z bezwładnością przemieszczających się lub obracających się zespołów. **Własności cieplne** natomiast należy wiązać z odkształceniami elementów układu konstrukcyjnego spowodowanymi źródłami ciepła występującymi wewnątrz maszyny, pochodzącymi od procesu skrawania i od otoczenia. Za miarodajne z punktu widzenia oceny poszczególnych własności przyjęto w pracy względne przemieszczenia między narzędziem a przedmiotem obrabianym wywołane odpowiednimi odkształceniami. Przemieszczenia te mają bezpośredni wpływ na dokładność wymiarowo – kształtową przedmiotu obrobionego. Skutkiem odkształceń statycznych i cieplnych są odchyłki wymiarowe przedmiotu, a odkształcenia dynamiczne, którym towarzyszą drgania układu konstrukcyjnego znajdują odzwierciedlenie na powierzchni przedmiotu obrobionego w postaci falistości.

W pracy stosowane jest również pojęcie **własności geometryczne obrabiarki**, które jest utożsamiane z jej dokładnością geometryczną. Jest ona ściśle zależna od niedokładności geometrycznych i kinematycznych zespołów ruchowych. Ma ona wpływ na błędy kształtu i położenia przedmiotu, które odzwierciedlają się falistością powierzchni obrobionej o dłuższej fali niż w przypadku drgań układu konstrukcyjnego. Z uwagi na podobny charakter skutków oddziaływania obrabiarki na dokładność kształtową przedmiotu obrobionego w postaci falistości, które związane są z własnościami geometrycznymi i dynamicznymi, obie te własności traktowane są w pracy łącznie. Pod stosowanym w pracy pojęciem **własności obrabiarki** rozumiane jest łączne traktowanie własności statycznych, dynamicznych i geometrycznych maszyny. Skutkiem oddziaływań obrabiarki związanych z tymi własnościami są niedokładności wymiarowe i kształtowe przedmiotu obrobionego. Pojęcie **własności obrabiarki i walory eksploatacyjne** uwzględnia dodatkowo proces skrawania, którego warunki wpływają głównie na chropowatość powierzchni przedmiotu obrobionego. Jedynie w tym przypadku ocena uwzględnia wszystkie składowe całkowitej odchyłki wymiaru przedmiotu obrobionego, na którą składają się odchyłki geometryczne, odchyłki kształtu i położenia oraz chropowatość jego powierzchni.

4. ANALIZA BŁĘDÓW PRZEDMIOTU OBRABIANEGO SPOWODOWANYCH CZYNNIKAMI WYNIKAJĄCYMI Z WŁASNOŚCI OBRABIAREK I PROCESU SKRAWANIA

4.1. CZYNNIKI SKŁADAJĄCE SIĘ NA CAŁKOWITĄ ODCHYLEKĘ WYMIARU

Z punktu widzenia technologii wytwarzania niemożliwe jest wykonanie elementów maszyn z absolutną dokładnością wymiarową [106]. Praktycznie nie jest też możliwe osiągnięcie geometrycznie doskonałych kształtów przedmiotów obrobionych, ponieważ powierzchnie obrabiane o różnych kształtach (np. walce, stożki, płaszczyzny itp.) wykazują większe lub mniejsze odchyłki od geometrii nominalnej [106]. Niedokładność obróbki można zdefiniować jako sumę systematycznych i przypadkowych odchyłek wymiarów przedmiotu obrabianego, uwarunkowanych pracą obrabiarki i narzędzia. [210]. Są one wyznaczone dla określonych sposobów obróbki w zdefiniowanych warunkach wytwarzania [210]. Błędy systematyczne są spowodowane przez geometryczne odchyłki zespołów maszyny, wpływy termiczne, odchyłki wywołane statycznymi i dynamicznymi odkształceniami układu konstrukcyjnego obrabiarki oraz niedokładności kinematyczne (np. podczas obróbki gwintów, kół zębatach). Błędy przypadkowe są wywołane rozrzutem położenia zespołów ruchowych przez układ pozycjonowania, przypadkowymi zmianami obciążeń lub drganiami występującymi w warunkach roboczych [210].

Odchyłki od nominalnej geometrii przedmiotu obrabianego są powodowane ogólnie przez czynniki zależne od [150]:

- obrabiarki (odchyłki prostoliniowości prowadnic, systematyczne i przypadkowe odchyłki położenia związane z błędami wywołanymi przez układ pozycjonowania, odkształcenia termiczne, odkształcenia wywołane siłami skrawania i mocowania, drgania układu konstrukcyjnego, odchyłki położenia i orientacji przedmiotu obrabianego w układzie mocowania),
- narzędzia (geometria, ustawienie i zamocowanie, stopień zużycia ostrza),
- przedmiotu obrabianego (geometria aktualna przed odpowiednią fazą skrawania jak: wymiary, odchyłki kształtu i położenia, chropowatość powierzchni; jego sztywność, gabaryty; niejednorodność materiału, jego własności (np. wytrzymałość, twardość))

- warunków procesu skrawania (parametry procesu skrawania, np. prędkość skrawania, posuw, głębokość skrawania, rodzaj cieczy obróbkowej).

Jakość obrobionego elementu jest oceniana na podstawie jego dokładności geometrycznej, własności materiałowych i jakości warstwy wierzchniej [80]. Wśród właściwości określających dokładność geometryczną należy zwrócić uwagę na jakość powierzchni obrobionej, ponieważ jest ona bezpośrednio związana z funkcjonalnymi charakterystykami produktu oraz na defekty powierzchniowe, które są zazwyczaj odpowiedzialne za błędy funkcjonalne [80]. Dla większości powierzchni obrobionych określić można trzy składowe dokładności wymiarowej przedmiotu [138]: błędy powierzchni (ang. *surface errors*), falistość i chropowatość powierzchni. Błędy powierzchniowe są spowodowane przez odkształcenia sprężyste i termiczne układu konstrukcyjnego obrabiarki. Są one miarą odchyłek od wymiarów nominalnych i określane jako błędy kształtu. Falistość powierzchni jest efektem pozostawienia na powierzchni śladów ostrza uzależnionych od geometrii narzędzia i kinematyki skrawania. Jest ona również skutkiem drgań, które zależą od zmiennych obciążeń występujących podczas obróbki i od własności dynamicznych obrabiarki. Chropowatość powierzchni jest związana z mikrostrukturalnymi zmianami materiału obrabianego [138], geometrią narzędzia, posuwem i względnymi drganiami między narzędziem i przedmiotem obrabianym) [12, 19, 20].

Dokładność przedmiotu obrabianego jest uwarunkowana wzajemnym nakładaniem się odchyłek wymiarowych, chropowatości powierzchni oraz geometrycznych odchyłek kształtu i położenia. Znajomość koniecznych i dopuszczalnych odchyłek od idealnej geometrii przedmiotu obrabianego ma zasadniczy wpływ na koszty wytwarzania, zwłaszcza gdy wymagana jest określona dokładność [110]. W procesie konstruowania często jest konieczne przyjęcie wstępnych wartości tolerancji wymiarów, kształtu i położenia oraz chropowatości powierzchni. Brak wiedzy w tym zakresie, szczególnie u konstruktorów lub projektantów, może prowadzić do nadmiernych kosztów produkcji spowodowanych założeniem zbyt wąskich pól tolerancji w stosunku do wymaganej dokładności przedmiotu obrabianego. Ogólnie dokładność obróbki można zdefiniować jako stopień zgodności między osiągniętymi w efekcie obróbki rzeczywistymi makro- i mikrogeometrycznymi parametrami powierzchni elementu a wymiarowymi i geometrycznymi parametrami wyspecyfikowanymi na rysunku wykonawczym [73, 138].

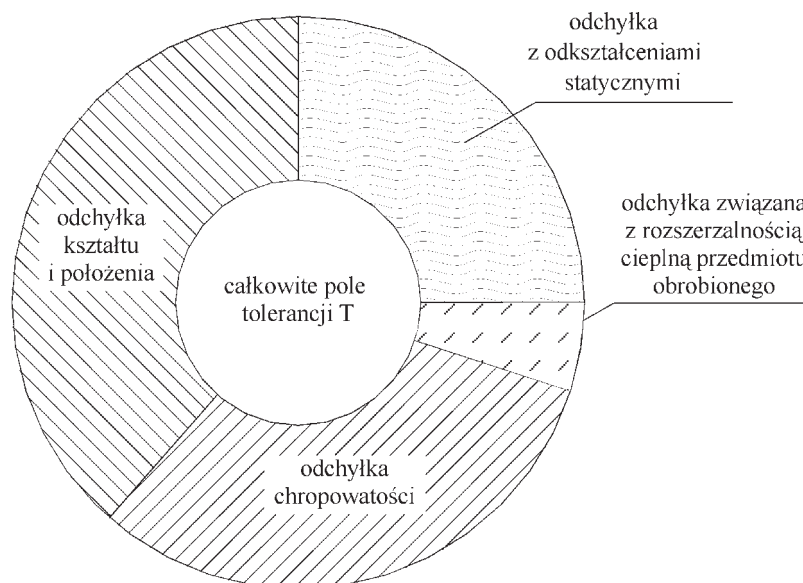
Na podstawie szeroko zakrojonych badań [61, 62, 105] prowadzonych przez wiele lat w przemyśle niemieckim i obejmujących różne gałęzie przemysłu ustalono, że aby podczas eksploatacji produkowanych maszyn i urządzeń mogła zostać utrzymana określona klasa dokładności wymiaru ich elementów, chropowatości i falistości obrobionych powierzchni nie powinny przekraczać określonych wartości dopuszczalnych. Wartości te wyodrębniono dla różnych klas dokładności ISO i wymiarów nominalnych w normie austriackiej [185] i w niemieckich zaleceniach VDI [209].

Całkowita odchyłka wymiaru ΔD (dopuszczalna odchyłka ΔD jest równa tolerancji wymiaru IT), odpowiadająca określonej klasie dokładności i określonemu zakresowi

wymiarów nominalnych, składa się z różnych odchyłek. Ich udział zależy od własności układu obrabiarka–uchwyt–przedmiot obrabiany–narzędzie (OUPN) oraz od warunków realizowanego procesu skrawania [130] (rys. 4.1). Na odchyłkę ΔD składają się więc:

- odchyłki związane z odkształceniami statycznymi układu OUPN pod wpływem obciążeń roboczych, sił zacisku i sił ciężkości,
- odchyłki kształtu i położenia związane z drganiami oraz błędami geometrycznymi i kinematycznymi obrabiarki,
- odchyłki chropowatości zależne przede wszystkim od realizowanego procesu obróbki,
- odchyłki wynikające z rozszerzalności cieplnej przedmiotu obrabianego.

Odkształcenia statyczne układu OUPN powstają na skutek oddziaływań siłowych podczas obróbki przedmiotu. Związane są one z siłami pochodzącymi od realizowanego procesu skrawania i od napędu. Zależą przede wszystkim od wartości i położenia wypadkowej siły skrawania w przestrzeni roboczej obrabiarki, która z kolei bezpośrednio wpływa na wartość i kierunek wypadkowej siły od napędu głównego i od napędu posuwów. Różne położenia siły skrawania są skutkiem zmian wzajemnych położzeń zespołów maszyny. Dla przedmiotów obrabianych o dużych gabarytach występują dodatkowo znaczne obciążenia bezwładnościowe, które również wywołują odkształcenia statyczne obrabiarek. Dla obrabiarek średniej wielkości dopuszczalny procentowy udział odchyłek związanych z odkształceniami statycznymi wynosi około 25% pola tolerancji w danej klasie dokładności [65].



Rys. 4.1. Udział różnych odchyłek w polu tolerancji wymiaru [130]

Fig. 4.1. Share of different deviations in the tolerance zone of a dimension [130]

Odchyłki kształtu przedmiotu obrabianego należą do grupy mikroodchyłek (np. falistość) lub do makroodchyłek (np. prostoliniowość, okrągłość, stożkowość, beczkowość) [150]. Związane są one z drganiami i błędami geometrycznymi obrabiarki [101]. Drgania względne zachodzące między narzędziem i przedmiotem podczas obróbki są powodowane składową zmienną siłą skrawania i napędu oraz niewyrównoważeniem elementów wirujących. Generują je również oddziaływania kinematyczne obrabiarki wynikające z błędów jej geometrii, które są powodowane niedokładnościami wykonawczymi i montażowymi (np. biciem wrzeciona) oraz zużyciem poszczególnych zespołów konstrukcyjnych. Duży wpływ na nadmierne drgania obrabiarki może mieć również zbyt mała sztywność jej całego układu konstrukcyjnego. Skutkiem drgań jest przede wszystkim falistość powstająca na powierzchni obrabianego przedmiotu. Ogranicza ona w znacznym stopniu dokładność jego wykonania, zwłaszcza w odniesieniu do obróbki ultraprecyzyjnej [94]. Ma bardzo duży wpływ na podstawowe właściwości użytkowe maszyn [118], takie jak: odporność na zużycie ściernie, skłonność do zacierania, sztywność i własności tłumiące połączeń [99]. Ze względu na występujące zazwyczaj trudności wzrokowe lub manualne zaobserwowania falistości na powierzchni obrabianej jest ona mierzona dużo rzadziej niż chropowatość [118].

Falistość jest definiowana jako *zbiór okresowo powtarzających się nierówności, charakteryzujących się tym, że stosunek odstepu między wierzchołkami nierówności do ich wysokości jest równy co najmniej 40* [196]. Można też spotkać zalecenia, aby jako konwencję przyjmować zakres, wyżej wymienionego stosunku, mieszczący się w granicach od 1000:1 do 100:1 [150]. Istnieją jednak pewne niejasności dotyczące definicji falistości [3], co dotyczy zwłaszcza oceny struktury geometrycznej powierzchni walcowych. W odniesieniu do takich powierzchni falistość traktuje się jako liczbę nierówności powtarzających się na obwodzie przedmiotu. Przyjmuje się zatem, że od 2 do 15 fal nierówności przypadających na jeden obrót przedmiotu jest związana z błędami okrągłości, a od 15 do 500 fal przypadających na profil okrągłości jest traktowana jako falistość powierzchni [3]. Nowe koncepcje analizy falistości zakładają określanie tylko dominującej długości falistości i dostosowanie do niej procedur filtracji [118].

Makroodchyłki kształtu mogą być powodowane przez błędy prostoliniowości prowadnic i ich zużycie, błędy zamocowania narzędzia i przedmiotu obrabianego, błędy ułożyskowania itp. Łączny udział wszystkich odchyłek kształtu może obejmować do około 50% pola tolerancji [105] i zmieniać się w zakresie od 31% do 49% [107]. Wartości dopuszczalnych odchyłek kształtu podaje norma [193]. Nie obejmuje ona jednak odchyłek falistości, ponieważ nie są one zdefiniowane w normie [192] jako odchyłki kształtu.

Stopień, w jakim odchyłka kształtu zmienia właściwości funkcjonalne powierzchni jest wypadkową wartości, charakteru deformacji i zadań, jakie ta powierzchnia powinna spełniać w wyrobie [167]. Czasem znacznie ekonomiczniejsze od podania dopuszczalnej wartości odchyłki (np. odchyłki okrągłości) jest bardziej precyzyjne określenie wymagań dotyczących wybranych harmonicznym widma zarysu [167]. Przykłado-

wo, w elementach toczyńnych tylko parzyste harmoniczne wpływają niekorzystnie na pracę wirującego zespołu, można więc dopuścić występowanie dużych amplitud składowych nieparzystych, gdyż nie pogorszy to właściwości funkcjonalnych tego zespołu. W pierścieniach łożyskowych można z kolei dopuścić znaczną owalność, ponieważ w wyniku odkształceń sprężystych przyjmą one kształt powierzchni elementu, w którym będą osadzone. Innym przykładem są współpracujące powierzchnie obracających się elementów, na których ograniczenie składowych harmonicznych nierówności o małej długości może znacznie zmniejszyć hałas urządzenia.

Odchyłki położenia przedmiotu obrabianego (np. równoległości, prostopadłości, współosiowości, przecinania się osi) oraz złożone położenia i kształtu (np. bicia promieniowego, bicia osiowego, kształtu wyznaczonego zarysu) powodowane są błędami zamocowania tego przedmiotu, błędami ułożyskowania wrzeciona, błędami prostoliniowości prowadnic lub błędami realizacji ruchów posuwowych (zwłaszcza w obrabiarkach sterowanych numerycznie). Definiowane są one, podobnie jak odchyłki kształtu, względem geometrycznie idealnych odpowiedników powierzchni lub linii rzeczywistych (elementów przylegających), które ze względów konstrukcyjnych są odpowiednikami współpracujących części [51]. W pomiarach bezpośrednich elementy przylegające są odwzorowywane w sposób materialny z użyciem liniałów, płyt, trzpieni kontrolnych lub sprawdzianów, a w przypadku pomiarów wspomaganym komputerowo element średni jest wyznaczany metodami numerycznymi.

Niektóre rodzaje odchyłek położenia, np. błędy współosiowości, mają duże znaczenie ze względu na żywotność i poprawność pracy zamontowanych łożysk [135], ale często można je wyznaczyć jedynie na stanowisku laboratoryjnym. Występowanie błędów położenia często nie wynika z gorszych własności obrabiarki, lecz może być związane ze złym zamocowaniem przedmiotu obrabianego. Wartości dopuszczalnych odchyłek, uwzględniając zakres wymiarów nominalnych i szeregi tolerancji położenia, podaje norma [193]. W odniesieniu do niektórych odchyłek norma wprowadza „poziom względną dokładność geometryczną”, który jest uzależniony od stosunku tolerancji położenia do tolerancji wymiaru. Tabele tolerancji wymiarów uwzględniają w tym przypadku klasy dokładności ISO, zamiast szeregów tolerancji. Tolerancje położenia zależne od szerszych, niż w normie [193], zakresów wymiarów nominalnych i klas dokładności ISO zaproponowano w pracy [106], ale uzależniono je dodatkowo od największego rozmiaru przedmiotu obrabianego.

Chropowatość powierzchni przedstawia zbiór nierówności powstających w wyniku procesu obróbkowego, przy czym przyjmuje się, że główną jej składową stanowi kinematyczno-geometryczne odwzorowanie wierzchołka ostrza narzędzia [100]. Jej definicja [197] – *elementy struktury geometrycznej powierzchni uformowane w czasie procesu jej kształtowania, nie zawierające falistości i odchyłek kształtu tej powierzchni* – wymaga uściślenia. Dostarcza go stwierdzenie, że chropowatość powierzchni składa się z *regularnie i nieregularnie powtarzających się odchyłek geometrycznych, których szerokości są niewielką wielokrotnością głębokości* (stosunek szerokości do głębokości bruzdy powinien się mieścić w zakresie od 100:1 do 5:1) [150]. Chropowatość po-

wierzchni obrabianej uzyskana w warunkach stabilnej obróbki w małym stopniu zależy od własności układu konstrukcyjnego obrabiarki. Utracie stabilności procesu skrawania towarzyszy przede wszystkim zwiększenie falistości tej powierzchni spowodowane dominującą składową drgań samowzbudnych. Zwiększa się również chropowatość tej powierzchni. W normalnych warunkach roboczych obrabiarki jest ona związana przede wszystkim z czynnikami obróbkowymi, takimi jak: geometria i stan ostrza narzędzia, parametry obróbki, rodzaj cieczy chłodząco-smarującej, rodzaj materiału obrabianego. W zaleceniach VDI 3219 [209] przyjęto, że wartość chropowatości nie może przekraczać 50% zakresu pola tolerancji.

W niektórych elastycznych systemach produkcyjnych jest stosowana technika monitorowania, w czasie rzeczywistym, każdego parametru procesu obróbki, który wpływa na chropowatość powierzchni. Odpowiednie algorytmy, wbudowane w układ sterowania, umożliwiają dokonywanie takich modyfikacji parametrów skrawania, aby uzyskać założone mikrogeometryczne właściwości powierzchni obrabianej [53]. Aktywne pomiary chropowatości są stosowane w operacjach obróbki wykańczającej, np. szlifowaniu, gładzeniu, polerowaniu oraz gładkościowym toczeniu bądź frezowaniu [98].

Przedmiotem wielu prac jest analiza spektralna [83] nierówności powierzchni obrabianej pod kątem wyodrębnienia i oceny różnych oddziaływań zespołów obrabiarki [11, 32, 46, 47, 53, 80, 82, 93, 119], narzędzia [17, 77], procesu skrawania [26, 111] lub konkretnych błędów jej struktury geometrycznej [17, 26, 37, 53]. Błędy kształtu i błędy związane z jakością powierzchni przedmiotu obrabianego mogą być klasyfikowane z użyciem analizy spektralnej, w zależności od trzech głównych składowych częstotliwościowych, na [121]:

- błędy kształtu (składowe niskoczęstotliwościowe),
- falistość (składowe o średnich wartościach częstotliwości),
- chropowatość powierzchni (składowe wysokoczęstotliwościowe).

Ustalenie zakresów długości fal nierówności odpowiadających konkretnym rodzajom błędów wymaga jednak każdorazowo uściślenia, w zależności od: rodzaju obróbki, geometrii stosowanego narzędzia i parametrów skrawania. W celu zapewnienia wyrobowi optymalnych warunków pracy i uniknięcia przyspieszonego zużycia się, udziały poszczególnych błędów, w całkowitym polu tolerancji, powinny być stałe we wszystkich zakresach wymiarów nominalnych. W związku z tym przesadna wydaje się tendencja wielu wytwórców do przypisywania pełnej wagi tylko jednemu rodzajowi błędów, a pomijania innych [116]. Przykładem na to może być pomijanie, w warunkach produkcyjnych, błędów okrągłości kulek tocznych z jednoczesnym nadzorowaniem ich chropowatości. W badaniach, cytowanych w pracy [116] podano, że kulka o średnicy 7,94 mm i odchyłce okrągłości 0,5 mm emitowała hałas od 15 do 20 dB większy niż kulka z odchyłką okrągłości 0,125 mm. Struktura geometryczna powierzchni kulek jest dużo mniej ważna niż ich okrągłość, ponieważ bardzo dobra gładkość ich powierzchni szybko pogarsza się po krótkim okresie eksploatacji łożyska, przy czym hałas wcale nie zwiększa się [116]. W ocenie błędów wykonania detalu należy więc także brać pod uwagę przeznaczenie wyrobu i wynikający z niego charakter jego pracy.

Błędy obróbki przedmiotu obrabianego, związane z jego rozszerzalnością cieplną, zależą od wielkości naddatków obróbkowych, wymiarów, masy i własności materiału przedmiotów oraz od intensywności chłodzenia. Własności cieplne całego układu konstrukcyjnego obrabiarki mają mały wpływ na dokładność wykonania pojedynczego przedmiotu, lecz objawiają się długofalowo w różnicach wymiarów przedmiotów wykonywanych seryjnie. Przemieszczenia zespołów obrabiarki wywołane czynnikami termicznymi powstają bardzo wolno, ale osiągają bardzo duże amplitudy [82]. Własności te oddziałują także na charakterystyki dynamiczne obrabiarki, które zmieniają się wskutek jej nagrzewania nawet do dwóch godzin po rozruchu maszyny [137]. Odkształcenia termiczne mogą być przyczyną nawet 40–70% całkowitego błędu obróbki [139].

W przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie wpływ tych odkształceń może być automatycznie kompensowany, a na pozostałych obrabiarkach korekcja odbywa się ręcznie. Obecnie do kompensacji odkształceń termicznych obrabiarek sterowanych numerycznie stosowane jest złożone oprogramowanie, wykorzystujące empiryczne funkcje kompensacji, symulację numeryczną z użyciem modeli uogólnionych lub oprogramowanie bazujące na sztucznej inteligencji (np. sieci neuronowe, algorytmy genetyczne lub logika rozmyta) [8, 43, 73, 139]. Niezależnie od tego, odkształceniom termicznym przeciwdziała się we wszystkich rodzajach obrabiarek przez działania konstrukcyjne (np. odpowiednie ukształtowanie elementów, umieszczenie silników na zewnątrz korpusów, stosowanie materiałów o małych współczynnikach rozszerzalności cieplnej), eksploatacyjne (np. wcześniejsze uruchomienie obrabiarki na biegu jałowym i doprowadzenie do ustalenia temperatury zespołów przed rozpoczęciem obróbki) [139]. Można też zmniejszać ilość ciepła wydzielanego w węzłach łożyskowych przez dobór odpowiednich łożysk i ich smarowania [58]. Udział zaś rozszerzalności cieplnej samego przedmiotu obrabianego, dla klas dokładności IT9–IT12, zawiera się w przedziale od 1 do 5% całkowitego błędu wykonania [105] i zwiększa się wraz z powiększaniem się średnicy przedmiotu obrabianego. Dla większej dokładności obróbki (klasy IT5–IT8) udział ten maleje, ze względu na mniejsze naddatki obróbkowe.

Wartości wszystkich odchyłek wymiarów zależą od rodzaju obróbki, jej dokładności i od zakresu wymiarów nominalnych. Dopuszczalne ich wartości pozostają w ścisłym związku z żadaną klasą dokładności wymiarowej przedmiotu obrabianego. Szeroko zakrojone badania statystyczne [61, 62, 105], przeprowadzone w wielu gałęziach przemysłu maszynowego, wykazały, że nadmierna chropowatość powierzchni powoduje szybką zmianę wymiaru, która pociąga za sobą utratę pasowania. Wynika to ze ścierania się wierzchołków mikronierówności po krótkim okresie eksploatacji współpracujących elementów maszyny. Aby zapobiec przyspieszonemu zużywaniu się współpracujących powierzchni maszyn i urządzeń, czyli zapewnić dotrzymanie określonej klasy dokładności wymiarowej elementów przyjęto, że dopuszczalny udział chropowatości powierzchni w dopuszczalnej sumarycznej odchyłce wymiarowej powinien być stały. Z tych samych względów przyjmuje się też, że powinien być stały udział dopuszczalnych odchyłek związanych z błędami kształtu do całkowitej tolerancji wymiaru [107]. Wymienione udziały mają charakter stały i niezależny od stanu techniki w dzie-

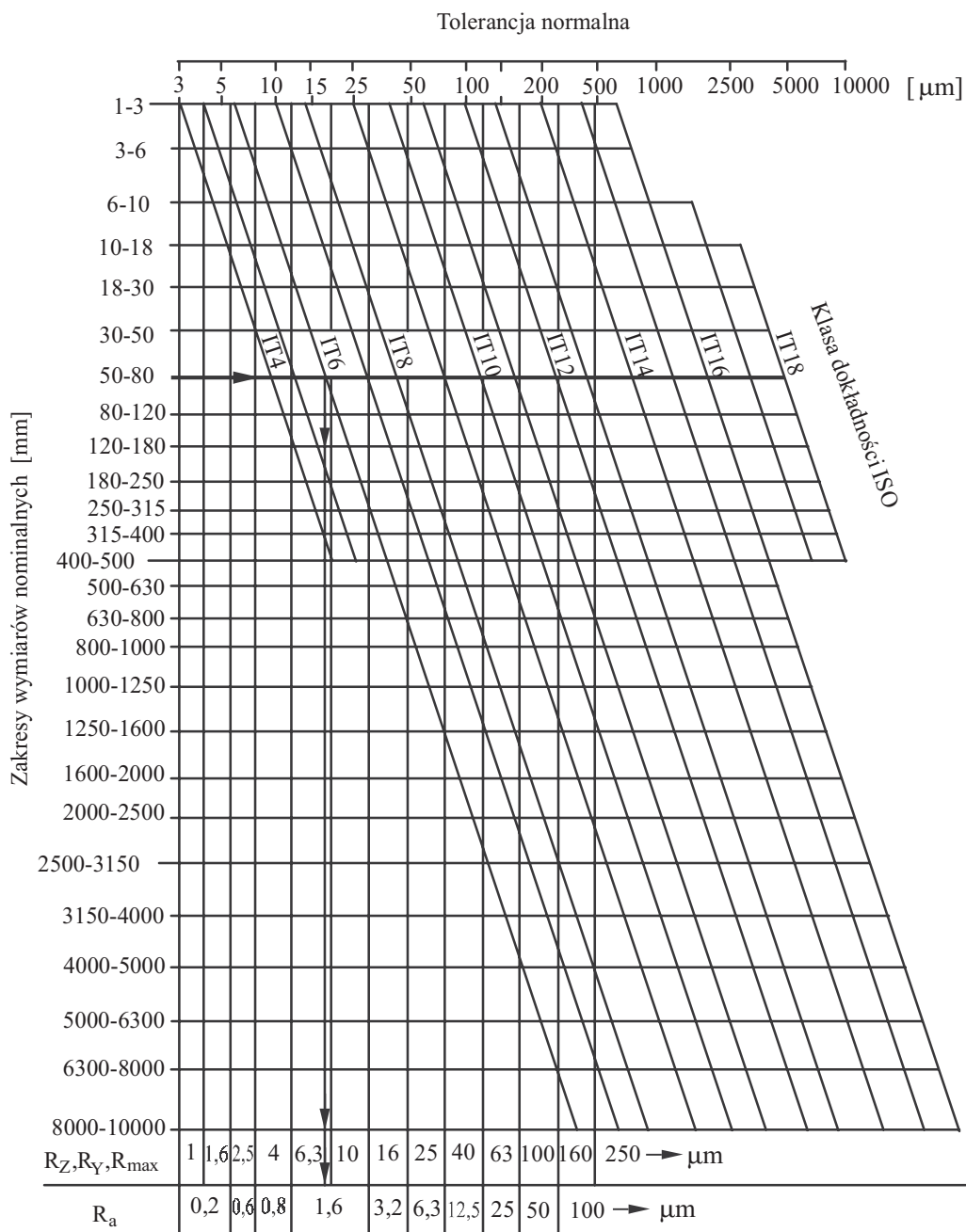
dzinie konstrukcji i technologii wytwarzania obrabiarek [65]. Nadmienić należy jednak, że dla dużych wymiarów nominalnych i tolerancji odpowiadających obróbce zgrubnej, tendencja do zachowania wspomnianej proporcjonalności odchyłek kształtu i chropowatości do tolerancji wymiaru nie jest utrzymana [107].

4.2. USTALENIE DOPUSZCZALNYCH ODCHYLEK SKŁADOWYCH CAŁKOWITEJ ODCHYŁKI WYMIARU

Wartości liczbowe odchyłek dopuszczalnych zostały ustalone na podstawie obszer-nych badań, w różnych gałęziach przemysłu [61, 62, 105], obejmujących pomiary chropowatości ponad 75000 powierzchni obrobionych i stały się podstawą ustaleń normalizacyjnych [185] i zaleceń [209]. W normie austriackiej [185] zamieszczony jest nomogram (rys. 4.2) do określania podstawowej tolerancji zalecanej chropowatości, w zależności od zakresu wymiaru nominalnego i żądanej klasy dokładności. Stabelaryzowane wartości dopuszczalnych odchyłek chropowatości przyporządkowane klasom dokładności ISO (tabela 4.1) zamieszczono w pracy [109]. Parametry chropowatości są zaokrąglone i przyjmują wartości znormalizowane, podobnie jak w polskiej normie [195].

Między tolerancją wymiarów i chropowatości występuje stosunek stały [108]. Wykorzystując wartości R_t podane w tabeli 4.1 przeprowadzono aproksymację zależności $R_t(D_s)$ funkcją typu $R_t = aD_s^b + 0,001D_s$ (gdzie D_s jest średnią geometryczną granic przedziałów wymiarów nominalnych, a parametry a i b współczynnikami aproksymowanej funkcji). Funkcja ta była podobna do zależności służącej do wyznaczania jednostki tolerancji i (zgodnie z normą [186]). Dla różnych klas tolerancji normalnej IT wyznaczono zależności przedstawione sumarycznie na rysunku 4.3, które odniesiono do wymiarów nominalnych. Obliczone wartości tej funkcji stanowiły od 34,2 do 34,9% (w zależności od klasy dokładności IT) obliczonych wartości funkcji tolerancji (według [186]), w tym samym rozpatrywanym przedziale wymiarów nominalnych. Przyjmując więc można, że dla wymiarów nominalnych nie przekraczających 500 mm, udział odchyłek chropowatości w całkowitych odchyłkach wymiarowych stanowi przeciętnie ok. 35%.

Wartości dopuszczalnych odchyłek kształtu podano w pracy [107], nie wnikając bliżej w ich naturę (tab. 4.2). Przyjęto przy tym zasadę, że dla przedmiotów z wymiarami tolerowanymi zarówno błędy kształtu, jak i maksymalna wysokość chropowatości mogą mieć wartości w przybliżeniu równe [108]. Założono także, że między tolerancjami wymiarową i kształtu występuje stosunek stały [120]. Można przyjąć, za pracą [107], że stosunek odchyłek kształtu do całkowitej odchyłki dopuszczalnej wymiaru, jaką stanowi tolerancja, wynosi przeciętnie 0,4. Występuje jednak odstępstwo od tych zasad dla dużych przedmiotów o wymiarach ponad 500 mm, obrabianych z mniejszą dokładnością (od klasy IT11 wzwyż), dla których dopuszczalne błędy kształtu mogą sięgać nawet 1 mm [108] (tab. 4.3), podczas gdy błędy chropowatości nie mogą przekroczyć



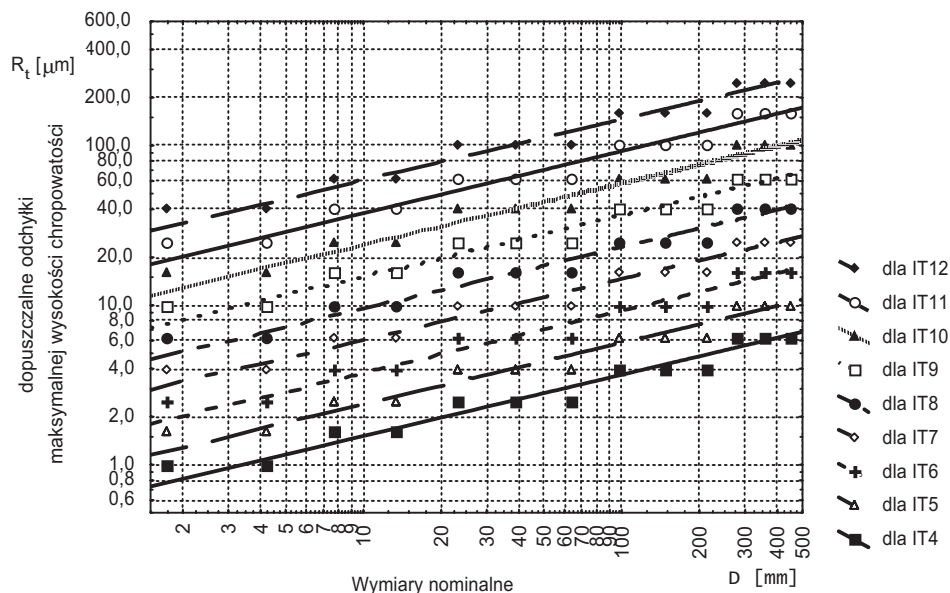
Rys. 4.2. Nomogram do wyznaczania dopuszczalnej chropowatości powierzchni w zależności od zakresu wymiarów nominalnych i klasy dokładności ISO (ÖNORM M1116 [185] cytowane za [110])

Fig. 4.2. Nomogram for determining of the permissible deviations of roughness in dependence on the step of nominal sizes and ISO accuracy grades (ÖNORM M1116 [185] cited after [110])

Tabela 4.1. Dopuszczalne odchyłki chropowatości R_t [μm] i R_a [μm] dla różnych klas dokładności ISO [109]Table 4.1. Permissible deviations of roughness R_t [μm] and R_a [μm] for the different ISO accuracy grades [109]

Zakresy wymiarów nominalnych [mm]		Klasa dokładności ISO												
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 – 3	R_t	1	1,6	2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100		
	R_a	0,1	0,2	0,2	0,4	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25		
3 – 6	R_t	1	1,6	2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100		
	R_a	0,1	0,2	0,2	0,4	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25		
6 – 10	R_t	1,6	2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100	160		
	R_a	0,2	0,2	0,4	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50		
10 – 18	R_t	1,6	2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100	160		
	R_a	0,2	0,2	0,4	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50		
18 – 30	R_t	2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100	160	250		
	R_a	0,2	0,4	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100		
30 – 50	R_t	2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100	160	250		
	R_a	0,2	0,4	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100		
50 – 80	R_t	2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100	160	250		
	R_a	0,2	0,4	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100		
80 – 120	R_t	4	6,3	10	16	25	40	63	100	160				
	R_a	0,4	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50				
120 – 180	R_t	4	6,3	10	16	25	40	63	100	160	250			
	R_a	0,4	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100			
180 – 250	R_t	4	6,3	10	16	25	40	63	100	160				
	R_a	0,4	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50				
250 – 315	R_t	6,3	10	16	25	40	63	100	160	250	250			
	R_a	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100	100			
315 – 400	R_t	6,3	10	16	25	40	63	100	160	250				
	R_a	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100				
400 – 500	R_t	6,3	10	16	25	40	63	100	160	250	250			
	R_a	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100	100			
500 – 630	R_t			16	25	40	63	100	160					
	R_a			1,6	3,2	6,3	12,5	25	50					
630 – 800	R_t			16	25	40	63	100	160	250				
	R_a			1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100				
800 – 1000	R_t			25	40	63	100	160						
	R_a			3,2	6,3	12,5	25	50						
1000 – 1250	R_t			25	40	63	100	160	250					
	R_a			3,2	6,3	12,5	25	50	100					
1250 – 1600	R_t			25	40	63	100	160						
	R_a			3,2	6,3	12,5	25	50						
1600 – 2000	R_t			40	63	100	160							
	R_a			6,3	12,5	25	50							
2000 – 2500	R_t			40	63	100	160	250						
	R_a			6,3	12,5	25	50	100						
2500 – 3150	R_t			40	63	100	160							
	R_a			6,3	12,5	25	50							

0,25 mm (tab. 4.2) w całym zakresie wymiarów nominalnych. Stały stosunek dopuszczalnych odchyłek kształtu do tolerancji wymiaru nie jest więc zachowany dla zgrubnych klas dokładności i dużych wymiarów nominalnych [107].



Rys. 4.3. Maksymalne dopuszczalne odchyłki chropowatości R_t klas dokładności ISO od IT4 do IT12
Fig. 4.3. Maximal permissible deviations of the surface roughness R_t for ISO accuracy grades IT4 to IT12

W analizie błędów kształtu konieczne jest rozróżnienie odchyłek pochodzących z niedokładności geometrycznej obrabiarki oraz odchyłek falistości. Podstawowym parametrem tej ostatniej jest wysokość falistości W_z [196]. Rozgraniczenie chropowatości, falistości i pozostałych błędów kształtu wymaga przeanalizowania widma długości fal nierówności na zarejestrowanym sygnale profilu obrobionej powierzchni. Wykorzystuje się do tego znormalizowane filtry [190], których zadaniem jest wydzielenie z sygnału pomiarowego profilu chropowatości lub falistości.

Najważniejszymi parametrami filtra są tzw. graniczne długości fali λ , które oznaczają długość fali, dla której określony procent amplitudy nierówności jest jeszcze przenoszony w procesie filtracji [103]. W przypadku filtrów ISO 2CR jest to 75% amplitudy, a dla filtrów gaussowskich ISO – 50%. Do filtracji falistości może być użyty filtr środkowo-przepustowy złożony z dwóch filtrów o parametrach granicznych długości fali λ_R (filtr chropowatości) i λ_F (filtr kształtu) (rys. 4.4) [196]. Wartości liczbowe obu parametrów dobiera się zgodnie z zasadami podanymi w pracach [55, 96, 103] i powinny one wynosić dla λ_R – 0,08, 0,25, 0,8 lub 2,5 mm, a dla λ_F – 2,5, 8 lub 25 mm [196]. Długość odcinka elementarnego l przyjmuje się w zależności od wartości parametrów R_a , R_z lub R_m i wynosi ona 0,08, 0,25, 0,8, 2,5, 8 lub 25 mm [195].

Tabela 4.2. Dopuszczalne odchyłki kształtu [μm] dla różnych klas dokładności ISO [107]Table 4.2. Permissible deviations of form [μm] for the different ISO accuracy grades [107]

Zakresy wymiarów nominalnych [mm]	Klasa dokładności ISO												
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 – 3	1,6		2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100		
3 – 6			2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100		
6 – 10		2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100	160		
10 – 18													
18 – 30	4	6,3	10	16	25	40	63	100	160	250			
30 – 50													
50 – 80													
80 – 120													
120 – 180	6,3	10	16	25	40	63	100	160	250	400			
180 – 250													
250 – 315													
315 – 400													
400 – 500			16	25	40	63	100	160	250	400	630		
500 – 630													
630 – 800													
800 – 1000													
1000 – 1250													
1250 – 1600													
1600 – 2000													
2000 – 2500													
2500 – 3150													
3150 – 4000													
4000 – 5000			63	100	160	250	400	630	1000				
5000 – 6300													
6300 – 8000													
8000 – 10000													

W analizie profilogramów wykorzystywane są również filtry λ_s do usuwania z zarejestrowanego profilu bardzo stromych wzniesień [162]. Parametr tego filtra – λ_s – przyjmowany jest w odniesieniu do przyjętego odcinka elementarnego l (przy czym $l = \lambda_R$) i stosunek $\lambda_R:\lambda_s$ wynosi najczęściej 300:1 [162] (np. $\lambda_s = 2,5 \mu\text{m}$ dla $\lambda_R = 0,8 \text{ mm}$ [190]). Należy podkreślić, że podstawą do cyfrowego przetwarzania profilu i do obliczania jego parametrów jest profil pierwotny, powstały po zastosowaniu filtracji profilu odwzorowanego z użyciem filtra o krótkiej długości fali λ_s [190].

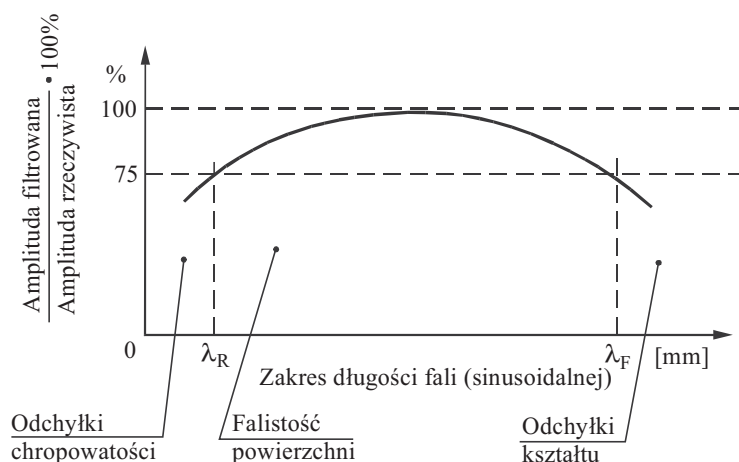
Tolerancje kształtu (prostoliniowości, płaskości, okrągłości, walcowości i zarysu przekroju wzdłużnego powierzchni walcowej) stanowią składowe tolerancje wymiaru. W skrajnym przypadku, cała tolerancja wymiaru może być wykorzystana jako tolerancja kształtu lub położenia. Najczęściej zakłada się, że tolerancje kształtu i położenia stanowią określoną część tolerancji wymiaru zależną od tzw. „poziomu względnej dokładności geometrycznej” [193]. Odpowiednie udziały tych tolerancji w całkowitej to-

lerancji wymiaru, przyjęte w normie [193], przedstawiono w tabeli 4.3. W uzasadnionych przypadkach udziały te dla najwyższej dokładności mogą być mniejsze. Wspomniana norma [193] podaje również, dla poszczególnych klas dokładności IT i różnych zakresów wymiarów nominalnych, konkretne wartości wybranych tolerancji kształtu i położenia, odpowiadające trzem poziomom względnej dokładności geometrycznej.

Przyjmując wcześniej uzasadnione założenie, że dla obrabiarek średniej wielkości, które stanowią około 90% parku maszynowego, dopuszczalny procentowy udział odchyłek związanych z odkształceniami statycznymi wynosi około 25% pola tolerancji w danej klasie dokładności [65], opracowano tabelę 4.4. Podano w niej liczbowe wartości dopuszczalnych odchyłek, związanych z odkształceniami statycznymi układu konstrukcyjnego obrabiarki, które wyznaczono, uwzględniając tolerancje normalne IT [186] dla wymiarów nominalnych nie przekraczających 500 mm i klas tolerancji normalnych w zakresie od IT4 do IT14.

Przeprowadzona analiza nie umożliwia ustalenia w sposób ścisły dopuszczalnych udziałów poszczególnych rodzajów odchyłek w całkowitym zakresie pola tolerancji wymiaru [130]. Zależą one także od rodzaju obrabiarki i od kształtu obrabianej powierzchni. Ze względu na szeroką bazę danych statystycznych związanych z analizą bardzo dużej liczby powierzchni obrabianych, ustalenia tych udziałów podane w pracy [109] przyjęć można za miarodajne. **Dlatego też w niniejszej pracy przyjmuje się udziały dopuszczalnych odchyłek chropowatości wynoszące 35% [109], dopuszczalnych odchyłek kształtu 40% [107], a udział dopuszczalnych odchyłek związanych z odkształceniami statycznymi 25% wartości tolerancji wymiaru [65].** Wydzielenie falistości z odchyłek kształtu może odbywać się automatycznie przez filtrację, a ustalenie udziałów dopuszczalnych jej odchyłek wymaga przeprowadzenia analiz wymiarowych, uwzględniających przeznaczenie przedmiotu, stopień zmienności, zamierzoną trwałość i niezawodność oraz rodzaj obróbki. W praktyce, dla dużych wymiarów, występują względnie małe błędy kształtu [109], a zwiększa się udział błędów położenia oraz błędów złożonych położenia i kształtu, ze względu na wzrost ciężaru przedmiotu obrabianego i jego oddziaływanie na elementy konstrukcyjne obrabiarki. Dlatego powyższe założenie dotyczące udziału omawianych dopuszczalnych odchyłek w polu tolerancji wymiaru jest słuszne w odniesieniu do wymiarów nie przekraczających 500 mm, a więc dla przedmiotów obrabianych na obrabiarkach małej i średniej wielkości.

W niniejszej pracy odchyłki falistości, kształtu, położenia i złożone odchyłki położenia i kształtu traktowane będą łącznie, jako odchyłki kształtu, gdyż ich wspólną cechą jest duża długość fal nierówności w porównaniu z ich wysokością. Przyjęta dopuszczalna wartość odchyłki kształtu, stanowiąca 40% całkowitej odchyłki wymiaru, odnosić się będzie do sumarycznej wartości wymienionych odchyłek. Zaznaczyć należy, że występowanie określonych odchyłek położenia i złożonych odchyłek położenia i kształtu zależy od specyfiki danej obrabiarki. Dla konkretnych rodzajów obrabiarek będą one uwzględniane, jeżeli ich udział w całkowitej odchyłce wymiaru przekroczy 5%. Przyjęte założenie o łącznym traktowaniu wspomnianych odchyłek obowiązywać



Rys. 4.4. Zasada filtracji falistości z użyciem filtrów ISO 2CR [196]

Fig. 4.4. Principle of the waviness filtration using ISO 2CR filters [196]

będzie jedynie w odniesieniu do metody oceny własności obrabiarek na podstawie efektów obróbki przedmiotów próbnych.

W procedurze oceny własności obrabiarek będą pominięte błędy spowodowane rozszerzalnością cieplną przedmiotu obrabianego, a to ze względu na znikomy ich udział (1–5% [105]) w całkowitym błędzie wykonania. Ze względu na przyjęty wstępny okres nagrzewania i stabilizacji termicznej obrabiarki oraz krótkotrwałość stosowanych testów skrawaniowych, nie będą również uwzględniane własności cieplne układu konstrukcyjnego maszyny, gdyż ich wpływ na uzyskiwaną dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotu obrabianego, wskutek inercyjności tego układu, może dopiero objawić się w dłuższym przedziale czasu. Podobne założenie przyjęto też w pracy [82], w której stwierdzono, że ze względu na krótki czas pomiaru, przemieszczenia osi wrzeciona wywołane czynnikami termicznymi mogą być pominięte.

Tabela 4.3. Procentowe udziały różnych tolerancji kształtu i położenia w całkowitej tolerancji wymiaru [193]

Table 4.3. Percentage share of the different tolerances of form and position in the total tolerance size [193]

Poziom względnej dokładności geometrycznej	Procentowy udział w całkowitej tolerancji wymiaru	
	Tolerancje: prostoliniowości, płaskości, równoległości	Tolerancje: okrągłości, walcowości, zarysu przekroju wzdłużnego powierzchni walcowej
wysoki	25%	12%
podwyższony	40%	20%
normalny	60%	30%

Tabela 4.4. Dopuszczalne odchyłki wymiarowe [μm], związane z odkształceniami statycznymi obrabiarki, dla różnych klas dokładności ISOTable 4.4. Permissible dimensional deviations [μm] due to the static deformation of machine tool for the different ISO accuracy grades

Zakresy wymiarów nominalnych [mm]	Klasa dokładności ISO										
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1 – 3	1		2	3	4	6	10	14	25	40	60
3 – 6				6	8	12	18	30	48	75	
6 – 0	1	2	3	4	6	9	15	22	36	58	90
10 – 18				7	11	18	27	43	70	110	
18 – 30	2	3	4	5	8	13	21	33	52	84	130
30 – 50				10	16	25	39	62	100	160	
50 – 80	3	4	6	5	8	12	19	30	46	74	120
80 – 120				11	14	22	35	54	87	140	220
120 – 180	4	5	7	10	16	25	40	63	100	160	250
180 – 250				12	18	29	46	72	115	185	290
250 – 315	5	6	8	13	20	32	52	81	130	210	320
315 – 400				14	22	36	57	89	140	230	360
400 – 500	5	7	10	16	24	40	63	97	155	250	400

Znajomość zależności między odchyłkami kształtu i chropowatości a tolerancją wymiaru może pomóc konstruktorom i technologom w dobraniu ściśle określonych tolerancji kształtu i chropowatości, jeżeli w rezultacie obróbki ma być uzyskana wymagana dokładność wymiarowo-kształtowa przedmiotu. Podane w tabelach dopuszczalne wartości chropowatości powierzchni i odchyłki kształtu oraz odchyłki wymiarowe przedmiotu obrabianego związane z odkształcalnością statyczną obrabiarki mogą stanowić bezpośrednie wartości odniesienia dla wyznaczonych odchyłek tego przedmiotu, ale nie będą stosowane do oceny własności i walorów eksploatacyjnych obrabiarek z użyciem opracowanej metody oceny.

5. METODA OCENY WŁASNOŚCI OBRABIAREK

W niemieckiej normie tymczasowej [171] stwierdza się, że *obecnie nie istnieją jeszcze żadne wartości graniczne związane zarówno z kryteriami minimalnej statycznej i dynamicznej sztywności obrabiarek, jak i z geometrycznymi i kinematycznymi odchyłkami występującymi pod wpływem obciążeń masowych, procesu skrawania i spowodowanymi czynnikami termicznymi*. Kolejne stwierdzenie, że *w celu dostarczenia niezbędnych podstaw konieczna jest statystyczna ocena dużej liczby obrabiarek* [171] jest dyskusyjne i wymaga uzupełnienia. Warunkiem koniecznym do przeprowadzenia takiej oceny jest dysponowanie właściwą, dającą wiarygodne wyniki, metodą oceny. Najstarsza statystyczna obróbka, nawet największej liczby przypadkowych wyników, obciążonych błędami przyjętej metody badań, nie doprowadzi do poprawnej oceny. Przykładem zastosowania błędnej metody są badania przeprowadzone w przemyśle niemieckim. Ich wyniki, prezentowane w pracy [156], dowiodły, że w grupie obrabiarek uznanych za dobre w swojej klasie występuje bardzo duży rozrzut wartości wyznaczonych sztywności statycznych i dynamicznych. Można więc przypuszczać, że zarówno metoda badań, jak i przyjęte wskaźniki oceny były niewłaściwe. Wątpliwości więc musi budzić stwierdzenie, że wyznaczone w toku tych badań podatności mogą służyć jako podstawa do oszacowania „zwyczajowo występujących sztywności” [158]. Zasadniczą wadą tych badań było oddzielenie oceny własności układu konstrukcyjnego obrabiarek od wymagań stawianych ich właściwościom eksploatacyjnym.

Do przeprowadzenia prawidłowej oceny własności układu konstrukcyjnego obrabiarki rozstrzygające znaczenie ma odpowiednie określenie wskaźnika oceny. Zapewnienie jednoznacznej i poprawnej oceny wymaga, aby wskaźnik ten [69]:

- w sposób prawidłowy odzwierciedlał jakościowy i ilościowy (jeśli jest to możliwe) wpływ ocenianej własności na eksploatacyjne właściwości maszyny,
- był reprezentatywny zarówno dla zbioru obciążeń, jak i dla zbioru struktur i stanów układu konstrukcyjnego maszyny, jakie mogą występować podczas jej eksploatacji.

Dysponowanie wartością odniesienia dla wskaźnika oceny decyduje o możliwości przeprowadzenia oceny bezwzględnej, która umożliwia stwierdzenie czy obrabiarka spełnia wymagania technologiczne. Przez ocenę względną autor uważa możliwość porównania dwóch układów konstrukcyjnych bez możliwości stwierdzenia, czy którykolwiek z nich spełnia te wymagania. Jeżeli w wypadku wytrzymałościowych obliczeń elementów maszyn wartość ta jest zwykle znana, to w ocenie własności układu konstrukcyjnego jej określenie napotyka trudności. Wartość odniesienia powinna bowiem

wynikać z wymagań przyjętych w procesie realizacji funkcji układu [69]. Jej wyznaczenie wymaga zatem znajomości zależności między wskaźnikiem oceny a parametrami charakteryzującymi ten proces. Inną drogą, stosowaną do wyznaczania wartości odniesienia, są statystyczne badania przeprowadzone na możliwie dużej populacji zrealizowanych konstrukcji układu [156, 171]. Uzyskanie w ten sposób poprawnych wyników jest jednak możliwe jedynie dla prawidłowo określonego wskaźnika oceny.

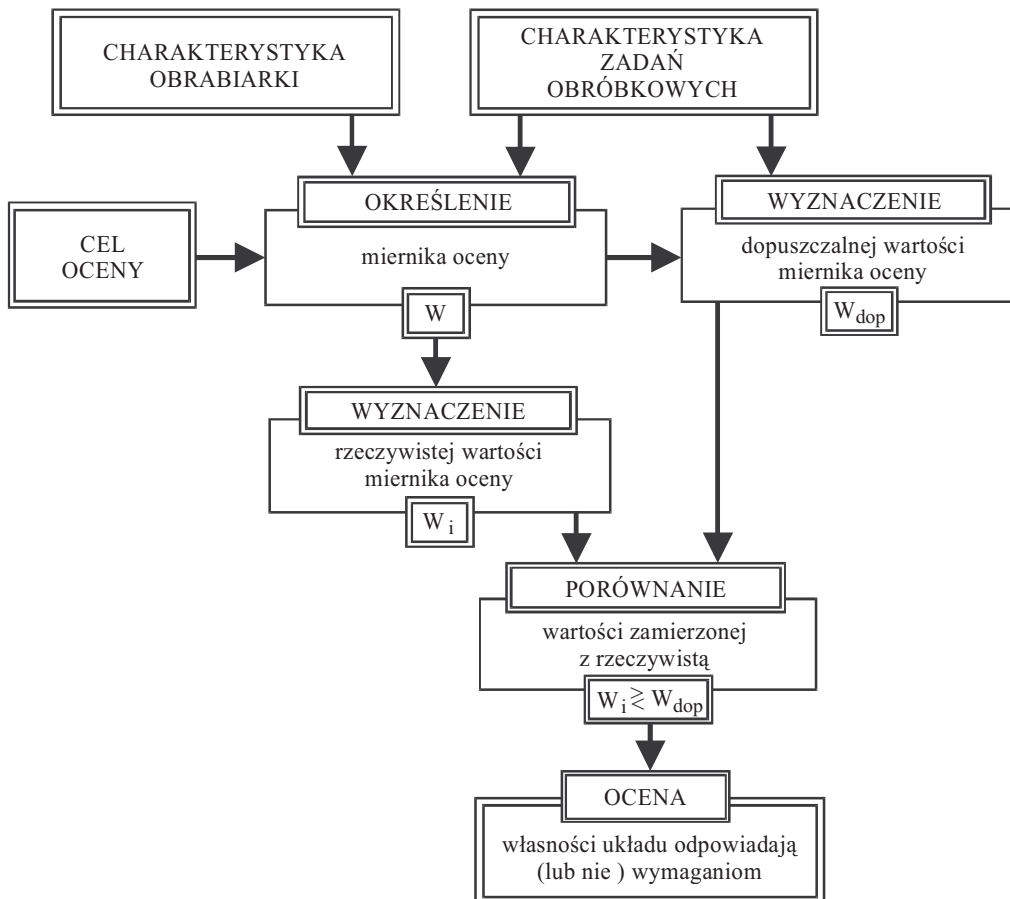
W ocenie konstrukcji większości maszyn rozstrzygające znaczenie mają kryteria wytrzymałościowe, w związku z czym weryfikuje się je po zastosowaniu najbardziej niekorzystnych obciążeń układu, które w praktyce mogą nigdy nie wystąpić. Ten sposób oceny nie nadaje się do zastosowania w przypadku obrabiarek skrawających, gdyż maszyny te są konstruowane z dużym „zapasem”, jeśli dotyczy to spełnienia warunków wytrzymałościowych. Obrabiarki ocenia się na podstawie osiąganych efektów obróbki, więc kryteria oceny powinny uwzględniać rzeczywisty rozkład obciążeń tych maszyn, a nie tylko najniekorzystniejsze ich przypadki.

Jedną ze stosowanych metod oceny obrabiarek jest tzw. analiza walorów użytkowych (niem. *Nutzwertanalyse*) [40]. Polega ona na wyszukiwaniu takiej optymalnej maszyny [41], która najlepiej spełnia zadane kryteria, stosownie do planowanych zadań obróbkowych. Do kryteriów tych zalicza się: rozmiary przestrzeni roboczej, osiąganą dokładność obróbki, czas maszynowy wykorzystania pełnej mocy, moment obrotowy na wrzecionie lub maksymalną prędkość obrotową, czas pomocniczy związany ze zmianami przedmiotu i oprzyrządowania, sposób zapamiętywania danych o narzędziach oraz dodatkowe wyposażenie maszyny. Do oceny parametrów obrabiarek, zawartych w bazie danych [39] obejmujących około 500 centrów obróbkowych, 500 tokarek i 300 frezarek stosowane są funkcje oceny wykorzystujące metodę czułości [44] i współczynniki wag [40]. Metoda ta nie nadaje się jednak do oceny własności konstrukcji obrabiarek, dlatego że wykorzystuje pewne gotowe parametry eksploatacyjne, które w pewnych warunkach mogą być uzyskiwane zarówno przez dobrą, jak i złą konstrukcję. Metoda ta może sprawdzać się natomiast w odniesieniu do oceny ekonomicznej planowanych inwestycji parku obrabiarkowego.

5.1. ZAŁOŻENIA METODY OCENY

Powszechnie stosowany model oceny własności obrabiarek opiera się na przyjmowanym a priori kryterium i mierniku oceny. Przyjmuje się, że powinien on określać ocenianą własność od strony fizycznej i być możliwie łatwy do wyznaczenia obliczeniowego lub pomiarowego [65]. Nie rozważa się natomiast sensu przyjętych wartości odniesienia dla wyznaczonych wskaźników oraz jednoznaczności oceny. Wspomniana „analiza stanu techniki”, w zakresie budowy obrabiarek [156] wraz z podejściem do oceny własności układu konstrukcyjnego, wykazała całkowitą nieprzydatność zdefiniowanych w sztywny sposób mierników oceny. Wydaje się to wystarczającą przesłanką do ich odrzucenia.

Nowe podejście do zagadnienia oceny zaproponowane zostało w pracy [65] (rys. 5.1). Miernik oceny uzależniono nie tylko od wyznaczanych charakterystyk statycznych, lecz również od celu, jakiemu ma służyć ocena i od zadań obróbkowych, które wykorzystano do wyznaczenia rozkładu obciążeń. Wprowadzono wskaźniki oceny uwzględniające ten rozkład w przestrzeni roboczej tokarki i odnoszono je do wartości powiązanych z klasą dokładności. Wprowadzono również wskaźnik przeznaczony do stosowania w badaniach odbiorczych. Tak więc wprowadzone wskaźniki uzależniono od ogólnego celu dokonywanej oceny własności. Metodę oceny przedstawioną w pracy [65] ograniczono do własności statycznych tokarek, które wyznaczano na maszynie będącej w stanie spoczynku. Można ją jednak stosować zarówno w odniesieniu do analiz obliczeniowych, jak i badań eksperymentalnych.



Rys. 5.1. Model oceny własności układu konstrukcyjnego obrabiarki [65]

Fig. 5.1 Model for assessment of properties of the machine tool structure [65]

W prezentowanej pracy wprowadzono wskaźniki, które umożliwiają dokonanie oceny układu konstrukcyjnego obrabiarki podczas badań prototypu i testów odbiorczych. Założono, że w obu typach badań przedmiotem oceny będzie dokładność wymiarowo-kształtowa przedmiotu uzyskana dla obciążeń odpowiadających obróbce wykańczającej. Ocena będzie więc dotyczyć własności obrabiarek, które ujawniają się w rzeczywistych warunkach pracy tych maszyn. Przyjęto, że na drodze pomiarowej i analizy sygnału można wydzielić błędy związane z własnościami statycznymi i dynamicznymi obrabiarki oraz z odchyłkami kształtu i chropowatością obrobionych powierzchni. Uwzględniono też fakt, że „najważniejsze parametry obrabiarki wynikają z analizy stawianych jej zadań obróbkowych” [40]. Wprowadzone wskaźniki mogą być również wykorzystane w procesie konstruowania obrabiarki.

W pracy przyjęto następujące założenia dotyczące sposobu obciążania obrabiarki oraz definiowania wskaźnika oceny:

- obciążanie obrabiarki powinno się odbywać dla warunków obróbki wykańczającej, z zapewnieniem stabilności procesu skrawania,
- stany obciążenia obrabiarki i odpowiadające im różne położenia zespołów roboczych powinny odpowiadać stawianym maszynie zadaniom technologicznym,
- wskaźnik oceny powinien uwzględniać związek między ocenianymi własnościami układu konstrukcyjnego a właściwościami eksploatacyjnymi konstruowanej obrabiarki, wyrażonymi dokładnością obróbki przedmiotu próbnego,
- wskaźnik oceny powinien umożliwiać dokonanie całościowej lub cząstkowej oceny własności i wybranych walorów eksploatacyjnych obrabiarki,
- wskaźnik oceny powinien stwarzać możliwość porównywania jego wartości ze zrozumiętymi wartościami odniesienia.

W formułowaniu tych założeń wzięto pod uwagę to, że tylko podczas realizacji skrawania występują wszystkie ruchy zespołów przesuwnych i wszystkie oddziaływania siłowe. Towarzyszą im odkształcenia i drgania elementów, wywołane siłami skrawania, masowymi, bezwładnościowymi i pochodzącymi od napędu. Siły te przyjmują odpowiednio wartości, kierunki i zwroty zależne od konstrukcji obrabiarki, geometrii ostrza narzędzia, własności materiału obrabianego i parametrów obróbki. Pewnych specyficznych zachowań siły skrawania nie można zamodelować lub zasymulować [137], i na tym polega przewaga metod badań realizowanych na obiekcie rzeczywistym w porównaniu z metodami obliczeniowymi.

Zaproponowana metoda oceny obrabiarek opiera się na szczegółowych założeniach wynikających z analizy spektrum zadań technologicznych [127] i wymagań dotyczących wprowadzanych wskaźników oceny:

- ustalić należy dominujące rodzaje obróbki i przyjąć je za reprezentatywne,
- ustalić należy rodzaje stosowanych narzędzi (ich geometria determinuje wzajemny stosunek składowych siły skrawania) i wyznaczyć ich udziały w planowanych operacjach technologicznych, a dominujące narzędzia przyjąć za reprezentatywne,
- dla ustalonych narzędzi i rodzaju obróbki jako reprezentatywne warunki obciążenia obrabiarki przyjąć należy siły skrawania odpowiadające katalogowym średnim wartościom parametrów skrawania dla obróbki wykańczającej,

- ustalić sposoby zamocowania przedmiotu obrabianego i określić ich udziały w planowanych operacjach technologicznych, a dominujące sposoby przyjąć za reprezentatywne,
 - przeanalizować należy zbiór stanów obciążeń, jakie potencjalnie mogłyby wystąpić w okresie eksploatacji (oddzielnie dla każdego, z przyjętych za reprezentatywne: rodzaju obróbki, narzędzia i sposobu mocowania) i ustalić rozkłady prawdopodobieństwa występowania skrawania w określonych polach przestrzeni roboczej obrabiarki,
 - pomiar wartości parametrów określających dokładność obróbki powinien odbywać się dla danego rodzaju obróbki w kierunku prostopadłym do powierzchni obrobionej,
 - opracowana metoda badawcza powinna umożliwiać wyznaczenie wskaźników oceny w odniesieniu do wydzielonych własności (statycznych, dynamicznych) i właściwości układu (geometria obrabiarki i czynniki uwarunkowane procesem skrawania),
 - wskaźniki powinny umożliwiać dokonanie oceny obrabiarki zarówno w warunkach badań prototypu, jak i testów odbiorczych.

Ogólne i szczegółowe założenia metody oceny obrabiarki mogą być uproszczone, jeśli wystąpią odpowiednie przesłanki, poparte danymi statystycznymi. Przykładowo, gdy w planowanych zadaniach obróbkowych dominuje określony sposób zamocowania przedmiotu lub określone narzędzie, wówczas zakłada się możliwość przyjęcia ich w procedurze oceny jako reprezentatywnych.

5.2. KRYTERIA I WSKAŹNIKI OCENY WŁASNOŚCI

Ogólnie jako kryterium oceny własności maszyn przyjmuje się pewną wielkość lub relację kilku wielkości fizycznych, które umożliwiają jednoznaczny osąd o tych własnościach i zachowaniu się układu konstrukcyjnego pod wpływem obciążeń zachodzących w warunkach eksploatacyjnych. Formułowanie kryteriów oceny jest zagadnieniem złożonym. Ich postać powinna zależeć od rodzaju i przeznaczenia obrabiarki, a więc podczas ich definiowania należy brać pod uwagę, czy jest to obrabiarka uniwersalna, zadaniowa lub specjalna. Stosownie do rodzaju obrabiarki, jej funkcje i obciążenia zależą od stawianych obrabiarce zadań technologicznych, które są bezpośrednio związane ze spektrum przedmiotów obrabianych. Spektrum to wpływa też zasadniczo na wymagania stawiane obrabiarce, gdyż narzuca konieczną do osiągnięcia dokładność obróbki.

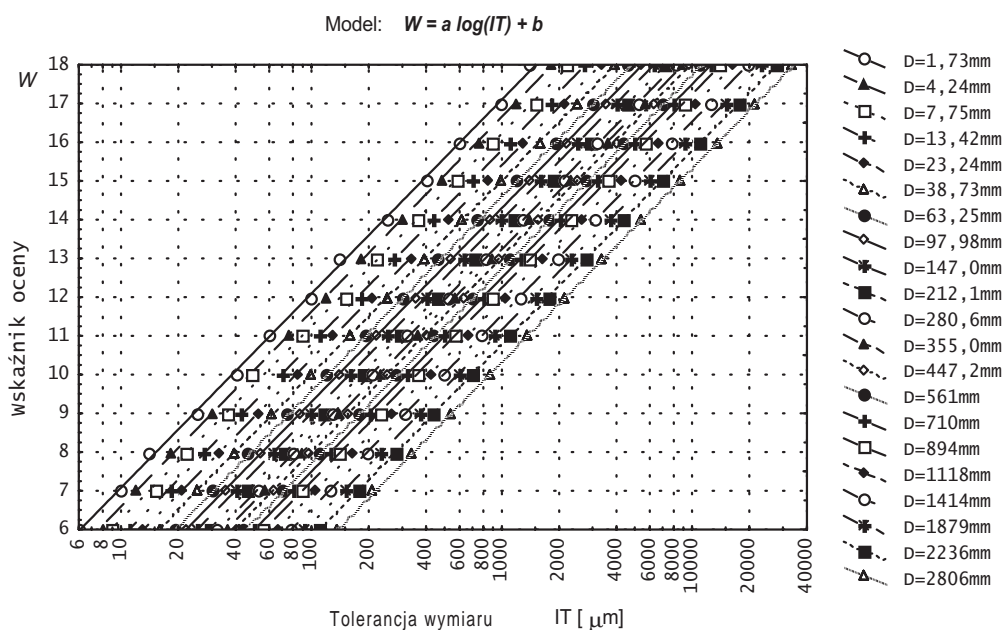
Kryteria oceny maszyn można podzielić na dwie grupy [21]:

- ogólnotechniczne – obejmują typowe wymagania (zależne od stanu techniki), dotyczące działania różnych maszyn, ich niezawodności, sprawności, estetyki, zużycia energii, możliwości wytwórczych i efektów ekonomicznych,
- funkcjonalne – uwzględniają skutki działania maszyn i towarzyszących obróbce zjawisk.

W monografii uwzględniono tylko kryteria funkcjonalne, gdyż są one charakterystyczne przede wszystkim dla obrabiarek i systemów wytwórczych. Przyjęto też założenie, że własności statyczne i dynamiczne oraz geometria obrabiarki i czynniki związane z procesem skrawania wywierają wpływ na dokładność obróbki, która jest wyra-

żona klasą dokładności ISO, czyli oddziałują na podstawową funkcję tej maszyny – kształtowanie przedmiotów obrabianych z zadaną dokładnością. W pracy zaproponowano metodę wydzielenia dopuszczalnych udziałów odchyłek związanych z poszczególnymi własnościami w całkowitym polu tolerancji przyjętym za dopuszczalną odchyłkę całkowitą. Zaproponowane wskaźniki W umożliwiają dokonanie oceny uwzględniającej zarówno pojedynczy rodzaj błędów, jak i wszystkie rozpatrywane błędy łącznie. Wskaźniki te są wyrażane w postaci liczbowej. Zmiana wymagań dotyczących wymiarów tolerowanych nie wpływa na wartości tych wskaźników, lecz zmienia jedynie wartości odniesienia. Wybór wskaźników uwzględniających parametry dokładności wymiarowo-kształtowej i jakości warstwy wierzchniej przedmiotu jest tym bardziej celowy, że należą one do grupy tych parametrów, które, w przypadku obróbki wykańczającej, są również stosowane w procesach optymalizacji parametrów skrawania [23].

Do wyznaczania wskaźników oceny W posłużono się, podobnie jak w pracy [65], tabelą wartości liczbowych tolerancji normalnych IT [186], z której wydzielono dwie grupy wymiarów nominalnych D : od 0 do 500 mm i od 500 do 3150 mm. Zastosowano taki podział, ponieważ dla tych grup wymiarowych stosuje się inne sposoby obliczania jednostek tolerancji normalnych [186]. Dla różnych wymiarów nominalnych D sporządzono wykresy zależności wskaźnika W (o wartościach liczbowych odpowiadających klasom dokładności ISO) od znormalizowanych tolerancji normalnych IT (rys. 5.2).

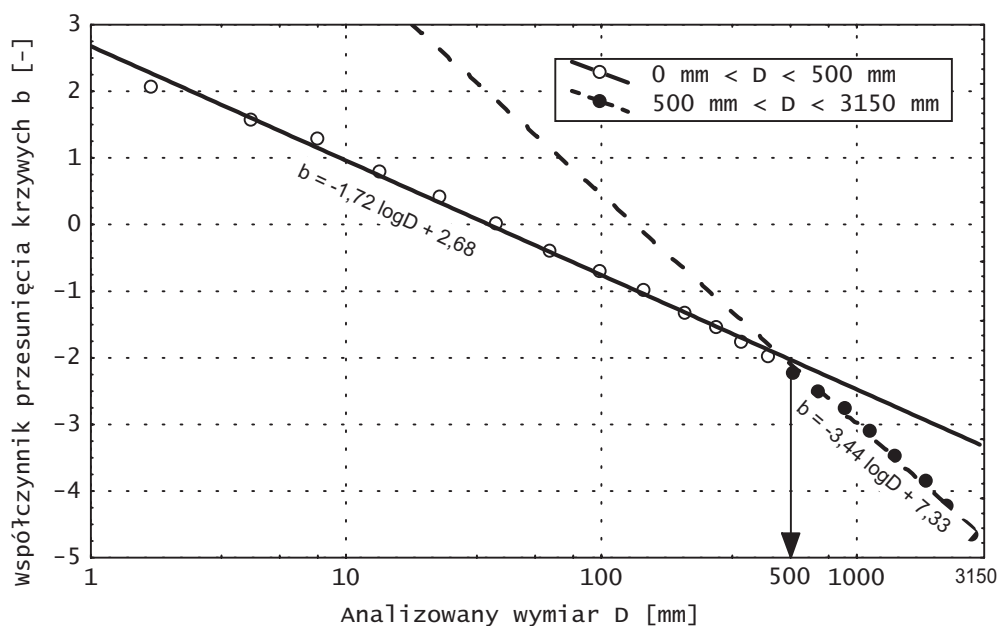


Rys. 5.2. Zależność wskaźnika oceny W od tolerancji wymiaru IT dla różnych wymiarów D odpowiadających średnim geometrycznym wartościom granic przedziałów wymiarów nominalnych

Fig. 5.2. Dependence of the assessment index W on the tolerance size IT for various sizes D corresponding to the geometric mean values of the step limits of nominal sizes

Wartości przyjętych do analizy wymiarów odpowiadały średnim geometrycznym wartościom granic przedziałów wymiarów nominalnych [186]. W zakresie wymiarów nominalnych od 0 do 3150 mm (dla obu przyjętych grup wymiarowych) i klas dokładności ISO od IT6 do IT18 wszystkie linie wykresów, przedstawione w skali logarytmicznej, były równoległe, a ich przesunięcie zależało od przyjętego do obliczeń wymiaru nominalnego.

Na podstawie danych z tych wykresów wyznaczono zależności (5.1) i (5.2). Użytkano je przez podwójną aproksymację dla obu grup wymiarowych, najpierw krzywych typu $W = a \log(IT) + b$ (por. rys. 5.2), a następnie krzywych $b = a_1 \log D + b_1$ (por. rys. 5.3), gdzie b było współczynnikiem przesunięcia kolejnych krzywych, wyznaczonych z poprzedniej zależności. Aproksymację przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów, wykorzystując pakiet programów STATISTICA 5.0. Zamiast tolerancji IT do wzoru podstawiono graniczne wartości całkowitej odchyłki wymiaru nominalnego ΔD . Jeśli przyjąć, że całkowita odchyłka wymiaru nominalnego ΔD nie powinna być większa od tolerancji wymiaru IT ($\Delta D \leq IT$), to wskaźnik oceny W (uwzględniając dane z wykresu rys. 5.2), wyznaczony dla konkretnego wymiaru D , przyjmuje postać:



Rys. 5.3. Zależność współczynnika przesunięcia krzywych b (por. rys. 5.2) od różnych wymiarów D odpowiadających średnim geometrycznym wartościom granic przedziałów wymiarów nominalnych dla dwóch zakresów wymiarów nominalnych

Fig. 5.3. Dependence of the curve shift coefficient b (see Fig. 5.2) on various sizes D corresponding to the geometric mean values of the step limits of nominal sizes for two ranges of nominal sizes

$$W = 5 \log(\Delta D) - 1,72 \log D + 2,68 \text{ dla } 0 \leq D \leq 500 \text{ mm} \quad (5.1)$$

lub

$$W = 5 \log(\Delta D) - 3,44 \log D + 7,33 \text{ dla } 500 \text{ mm} < D \leq 3150 \text{ mm} \quad (5.2)$$

gdzie: ΔD – całkowita odchyłka wymiaru, [μm],

D – analizowany wymiar, [mm].

Gdy całkowita odchyłka wymiaru ΔD jest równa tolerancji IT w danym przedziale wymiarów nominalnych i w danej klasie dokładności, czyli odpowiada granicznej odchyłce dopuszczalnej, wówczas wskaźnik W przyjmuje wartość odpowiadającą wartości liczbowej tej klasy dokładności. Im odchyłka ΔD jest mniejsza, tym wskaźnik W przyjmuje mniejsze wartości, czyli jego wartość świadczy o osiągnięciu większej dokładności wymiarowej przedmiotu obrobionego (niższej klasy dokładności). Oceniana obrabiarka jest więc lepsza.

Stosownie do planowanego celu oceny wprowadzono wskaźniki oceny spełniające warunki wynikające z prowadzonych badań prototypu lub badań odbiorczych obrabiarki:

- globalny wskaźnik oceny W_g – służący do oceny własności układu konstrukcyjnego, uwzględniający zadania obróbkowe stawiane obrabiarce w całej przestrzeni roboczej,
- odbiorczy wskaźnik oceny W_o – służący do oceny własności układu konstrukcyjnego podczas badań odbiorczych.

Globalny wskaźnik oceny W_g można zdefiniować, przez analogię z pracą [65], jako średnią ważoną wartości wskaźników oceny W , wyznaczonych na podstawie pomiarów odchyłek wymiarowych, odchyłek kształtu i chropowatości powierzchni grupy przedmiotów obrobionych, które obejmują swoimi wymiarami reprezentatywne obszary przestrzeni roboczej obrabiarki. Konfiguracje struktury maszyny zależą więc od gabarytów zastosowanych przedmiotów i od rozmieszczenia powierzchni obrabianych. Wartości i kierunki obciążeń wynikają z geometrii narzędzi i parametrów obróbki przyjętych za reprezentatywne, a punkty zaczepienia wypadkowej siły skrawania zależą od spektrum stawianych obrabiarce zadań technologicznych. W odniesieniu do parametrów skrawania przyjęto w założeniach (por. rozdz. 5.1), że powinny one odpowiadać średnim wartościom katalogowym stosowanym w obróbce wykańczającej, przewidzianym dla przyjętych rodzajów narzędzi i sposobów obróbki. Wskaźniki mogą przy tym przybierać wszystkie wartości pośrednie między liczbami oznaczającymi klasy dokładności IT . Za wartości graniczne dla tak wyznaczonych wskaźników przyjmuje się wartości liczbowe klasy dokładności IT odpowiadające obróbce wykańczającej na danym typie obrabiarki. Wśród różnych badanych rozwiązań konstrukcyjnych najkorzystniejszy będzie wariant o najmniejszej liczbowej wartości globalnego współczynnika oceny W_g .

W pewnych przypadkach globalne wskaźniki oceny obrabiarki W_g można wyznaczyć z zastosowaniem narzędzi i parametrów odpowiadających obróbce zgrubnej lub

w warunkach wykorzystania pełnej mocy napędu głównego. W pierwszym przypadku ma to znaczenie raczej pogładowe, ponieważ w obróbce zgrubnej nie przywiązuje się większej wagi do dokładności wymiarowej, gdyż jest to tylko pośredni etap kształtowania przedmiotu. Odchyłki wymiarów nie powinny jednak przekraczać wartości odchyłek dopuszczalnych, odpowiadających wymiarom nietolerowanym [194]. W związku z tym graniczne wartości wskaźników nie powinny być większe od liczby, odpowiadającej klasie dokładności wymiarów nietolerowanych, która jest związana z danym typem obrabiarki. W drugim przypadku jest podobnie, lecz sprawdzenie wartości wskaźnika może być dodatkowo przydatne do oceny jego „zapasu” w stosunku do takiej „granicznej” klasy dokładności.

Odbiorczy wskaźnik oceny W_o zdefiniowano jako liczbę odpowiadającą klasie dokładności wymiaru, uzyskanego podczas obróbki reprezentatywnego przedmiotu w taki sposób, że punkt zaczepienia wypadkowej siły skrawania znajduje się w miejscu, w którym występuje maksimum rozkładu częstości występowania siły skrawania w przestrzeni roboczej danej obrabiarki. W wypadku badań odbiorczych można użyć jednego obciążenia, ponieważ w ich trakcie porównuje się własności układów o jednakowej konstrukcji. Wartości wskaźników powinny być również wyznaczane w warunkach obróbki wykańczającej, a więc parametry skrawania powinny odpowiadać średnim wartościom katalogowym przewidzianym dla przyjętego narzędzia i sposobu obróbki. Dla uproszczenia, we wszystkich badaniach danego typu obrabiarki należy przyjmować takie samo narzędzie i taki sam rodzaj obróbki. Graniczne wartości wskaźnika W_o powinny podlegać takim samym regułom, jak w przypadku wcześniej omawianego wskaźnika W_g i należy je umieszczać, wraz z warunkami pomiaru, w warunkach odbioru technicznego (WOT) danej obrabiarki. Wyznaczone wartości wskaźnika W_o powinny być ujmowane w protokole odbioru.

Warunki wyznaczania obu wskaźników oceny powinny precyzować rodzaj i stan materiału, jego kształt i sposób mocowania oraz miejsca i procedurę pomiaru odchyłek wymiarowych. Wymagania dotyczące materiałów przedmiotów próbnych powinny być podane w normach sprawdzania dokładności poszczególnych grup obrabiarek [200]. Polska norma [187] podaje, że jeśli w normach nie postanowiono inaczej, to przedmiot obrabiany, jego wymiary, materiał i klasę należy ustalić w wyniku uzgodnień producenta z użytkownikiem. Przed 30 laty przyjęto zasadę, że do testów skrawaniowych powinna być stosowana niskowęglowa stal, w stanie normalizowanym, o przeciętnej zawartości węgla od 0,35 do 0,45% [15]. W niemieckich wytycznych przyjmuje się [211], że w statystycznych badaniach dokładności obróbki jest stosowana zwykle stal 45 lub inne materiały po uzgodnieniu. W prezentowanej pracy jako materiał reprezentatywny przyjęto więc stal 45.

W wyborze sposobu mocowania przedmiotu próbnego należy mieć na uwadze już przeprowadzone, w odniesieniu do konkretnych typów obrabiarek, badania statystyczne i przyjąć najczęściej występujący rodzaj mocowania. Można też, na podstawie znajomości planowanych operacji technologicznych, ustalić procentowe udziały poszczególnych mocowań w programie produkcyjnym i wykonać odpowiednie badania, przyj-

mując te udziały, jako wagi przy wyznaczaniu wskaźników. Miejsca i procedurę pomiaru odchyłek wymiarów należy ustalić indywidualnie dla każdego rodzaju i wielkości obrabiarki, mając na względzie nie tylko rzeczywisty rozkład obciążeń w przestrzeni roboczej, lecz także wpływ rodzaju obrabiarki na powstawanie błędów określonego typu. W tym wypadku należy zwrócić uwagę na kierunki przyjęte za „wrażliwe”, czyli kierunki przemieszczeń układu konstrukcyjnego najbardziej wpływające na dokładność wymiarowo-kształtową obrabianego przedmiotu.

Wprowadzono też dodatkowe wskaźniki (por. rys. 5.4), które umożliwiają dokonywanie cząstkowej oceny, czyli jej zawężenie do własności statycznych, dynamicznych i geometrycznych obrabiarki oraz do czynników związanych z procesem skrawania. Wskaźniki te są definiowane podobnie, jak wcześniej omawiane wskaźniki globalny W_g i odbiorczy W_o , lecz odnoszą się do oceny odchyłek wymiarowych spowodowanych oddzielnie przez każdy z wymienionych czynników. Do wskaźników tych należą:

- globalny wskaźnik oceny własności statycznych W_g^s – do oceny własności statycznych układu konstrukcyjnego w badaniach prototypu, uwzględniający zadania obróbkowe stawiane obrabiarence w całej przestrzeni roboczej,
- globalny wskaźnik oceny błędów kształtu W_g^k – do oceny własności dynamicznych układu konstrukcyjnego i dokładności geometrycznej w badaniach prototypu, uwzględniający zadania obróbkowe stawiane obrabiarence w całej przestrzeni roboczej,
- globalny wskaźnik oceny chropowatości powierzchni W_g^c – do oceny uzyskiwanej chropowatości powierzchni w badaniach prototypu, uwzględniający zadania obróbkowe stawiane obrabiarence w całej przestrzeni roboczej,
- odbiorczy wskaźnik oceny własności statycznych W_o^s – do oceny własności statycznych układu podczas badań odbiorczych,
- odbiorczy wskaźnik oceny błędów kształtu W_o^k – do oceny własności dynamicznych układu konstrukcyjnego i dokładności geometrycznej podczas badań odbiorczych,
- odbiorczy wskaźnik oceny chropowatości powierzchni W_o^c – do oceny uzyskiwanej chropowatości powierzchni podczas badań odbiorczych.

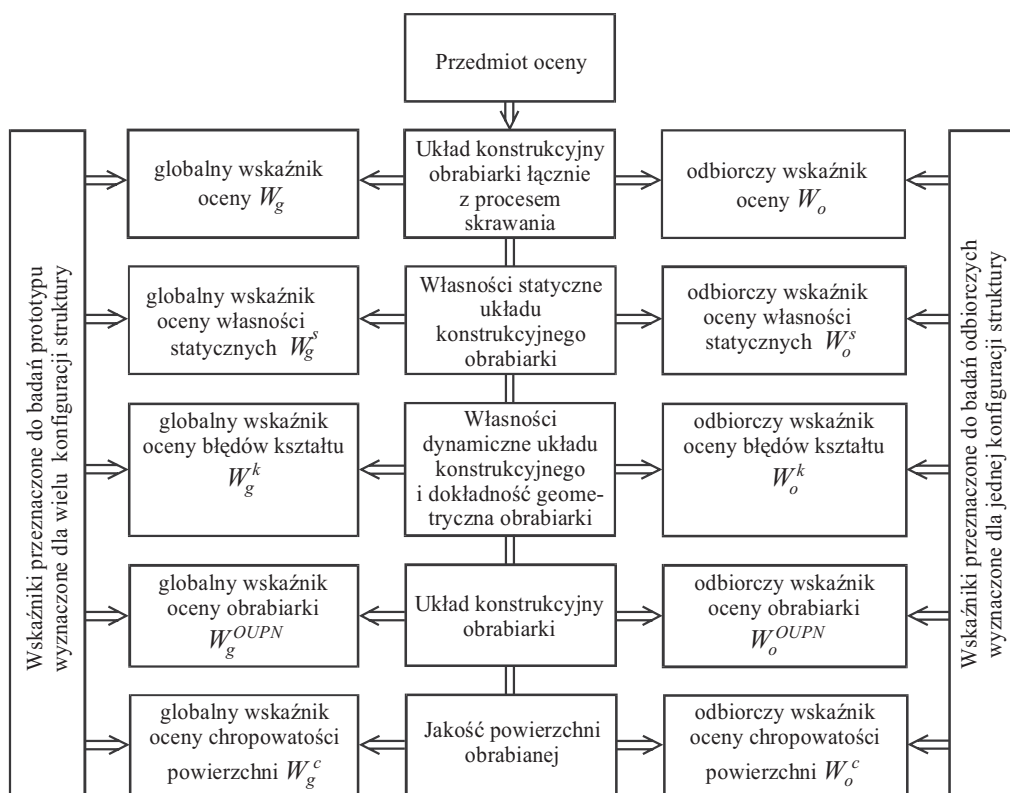
Przy wyznaczaniu tych wskaźników należy zwrócić uwagę na podstawianą do wzorów (5.1) lub (5.2) całkowitą odchyłkę wymiaru ΔD . W przypadku wskaźników oceny W_g i W_o odchyłka ta jest przyjmowana w naturalny sposób, jako suma składowych odchyłek cząstkowych

$$\Delta D = \Delta d^s + \Delta d^k + \Delta d^c \quad (5.3)$$

gdzie: Δd^s – odchyłka wymiaru spowodowana odkształceniami statycznymi układu,
 Δd^k – odchyłka wymiaru wywołana błędami geometrycznymi i drganiami obrabiarki,

Δd^c – odchyłka wymiaru związana z chropowatością powierzchni.

W odniesieniu do wskaźników oceny $W_g^s, W_g^k, W_g^c, W_o^s, W_o^k, W_o^c$, używana do ich wyznaczania odchyłka ΔD nie jest, w sensie fizycznym, całkowitą odchyłką wymiaru. Jest to ekwiwalentna całkowita odchyłka wymiarów, wprowadzona do porównania wła-



Rys. 5.4. Zestawienie wprowadzonych wskaźników oceny

Fig. 5.4. Specification of the established indexes of evaluation

sności cząstkowych układu. Umożliwia ona dokonywanie równoważnej oceny cząstkowej, z użyciem tych samych wartości kryterialnych, które są stosowane dla pełnej oceny obrabiarki (uwzględniającej własności statyczne, dynamiczne i geometryczne oraz jakość powierzchni obrabianej). Tak więc ekwiwalentne całkowite odchyłki wymiarowe ΔD są przyjmowane według zależności:

- dla wskaźników oceny własności statycznych W_g^s i W_o^s

$$\Delta D = \frac{\Delta d^s}{0,25} = 4 \Delta d^s \quad (5.4)$$

- dla wskaźników oceny błędów kształtu W_g^k i W_o^k

$$\Delta D = \frac{\Delta d^k}{0,4} = 2,5 \Delta d^k \quad (5.5)$$

- dla wskaźników oceny chropowatości powierzchni W_g^c i W_o^c

$$\Delta D = \frac{\Delta d^c}{0,35} = 2,86 \Delta d^c \quad (5.6)$$

Liczby przyjęte w mianownikach wyrażeń (5.4)–(5.6) wynikają stąd, że na podstawie badań statystycznych [61, 62, 107–109] przyjęto udziały dopuszczalnych odchyłek chropowatości wynoszące – 35%, dopuszczalnych odchyłek kształtu – 40%, a udział dopuszczalnej odchyłki związanej z odkształceniami statycznymi – 25% tolerancji wymiaru (por. rozdz. 4.2). Sumaryczna dopuszczalna odchyłka nie może być większa od tolerancji wymiaru. Podzielenie każdej z rozpatrywanych odchyłek cząstkowych przez jej udział w tolerancji wymiaru stwarza możliwość jednakowego ich odnoszenia do ekwiwalentnej całkowitej odchyłki wymiaru i wskaźnika związanego z klasą dokładności. Umożliwia więc dokonywanie oceny każdej z tych odchyłek cząstkowych, niezależnie od pozostałych. Zależności (5.4)–(5.6) są słuszne w odniesieniu do obrabiarek małej i średniej wielkości, na których obrabia się przedmioty o wymiarach nie przekraczających 500 mm. Dla takich wymiarów zachowane są przyjęte proporcje odchyłek cząstkowych w odniesieniu do tolerancji wymiaru. Zależność (5.3) jest słuszna dla obrabiarek wszystkich wielkości.

Zestawienie wprowadzonych wskaźników oceny zamieszczono na rysunku 5.4. W zestawie proponowanych wskaźników nie ujęto wpływu własności cieplnych obrabiarki. Trudno jest oceniać ich wpływ na dokładność przedmiotu obrabianego, gdyż zazwyczaj, w celu eliminacji skutków odkształceń cieplnych, dokonywana jest w trakcie pracy obrabiarki ręczna korekcja lub automatyczna kompensacja nastaw. Wzory na obliczanie jednostek tolerancji [186] uwzględniają, „rosnące wraz z wymiarami, błędy pomiaru spowodowane wahaniami temperatury w czasie produkcji” [54]. Błędy te będą jednak pominięte, ponieważ ich udział nie przekracza 1–5% całkowitej odchyłki wymiaru [54].

W odniesieniu do własności dynamicznych układu konstrukcyjnego i jego dokładności geometrycznej zastosowano wspólne wskaźniki W_g^k i W_o^k . Oba te czynniki wpływają na powstawanie falistości na powierzchni przedmiotu obrabianego. Ze względu na metrologię nie ma problemów z wydzieleniem z profilu powierzchni fal o największych długościach, związanych z błędami geometrycznymi obrabiarki. Autor nie dysponuje jednak danymi, które umożliwiłyby określenie procentowych udziałów błędów związanych z drganiami maszyny i błędów spowodowanych jej niedokładnościami geometrycznymi w całkowitym błędzie kształtu. Stąd wynika łączne traktowanie obu rodzajów błędów jako błędów kształtu. Wydzielenie z widma profilu falistości powierzchni konkretnych fal, związanych z błędami geometrycznymi obrabiarki, może być jednak problemem, gdyż do ich wyznaczenia mogą być konieczne dłuższe odcinki pomiarowe niż te, które konwencjonalnie stosuje się w pomiarze falistości.

Wskaźniki oceny chropowatości powierzchni przedmiotów obrabianych wprowadzono ze względu na to, że jakość tej powierzchni jest często jednym z rozstrzygających kryteriów oceny po końcowej (ostatecznej) obróbce. W badaniach odbiorczych obrabiarek stosowane są natomiast próby pracą, które są prowadzone właśnie w warunkach obróbki wykańczającej. Może się nasuwać pytanie o sensowność oceny obrabiarki na podstawie chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego, która w istocie zależy od technologii wytwarzania i parametrów procesu, a mniej od własności badanej obrabiarki. W badaniach odbiorczych żąda się też często czegoś przeciwnego – dotrzymania tolerancji kształtu, bez zwracania uwagi na jakość powierzchni badanego przedmiotu próbnego [158]. Skutkiem tego może być błędna interpretacja chropowatości jako błędów kształtu. Problematyka ta nie została dotychczas rozwiązana w postaci konkretnych zaleceń, więc praca ta dostarcza tylko narzędzia do oceny chropowatości powierzchni przedmiotu obrobionego w sposób niezależny od oceny błędów wykonania przedmiotu obrabianego, spowodowanych własnościami obrabiarki. Stworzona jest również możliwość dokonania łącznej oceny wszystkich odchyłek wymiarowych. Wiele zakładów nie jest zainteresowanych pomiarem odchyłek kształtu wytwarzanych przedmiotów obrabianych, lecz zwraca jedynie uwagę na chropowatość powierzchni [107]. Podejście to musi ulec zmianie, ze względu na duży wpływ odchyłek kształtu wytworzonego elementu na jego właściwości użytkowe.

Podsumowując można stwierdzić, że wprowadzone wskaźniki oceny:

- umożliwiają uwzględnienie ogólnego celu dokonywanej oceny własności i wprowadzenie rozgraniczenia w sposobie dokonywania oceny w toku badań prototypu i badań odbiorczych,
- są wyznaczane w obciążeniach zachodzących w warunkach roboczych, w trakcie realizacji procesu skrawania,
- są reprezentatywne dla zbioru obciążeń i stanów układu konstrukcyjnego obrabiarki, jakie mogą występować podczas jej eksploatacji,
- wiążą wpływ ocenianej własności z eksploatacyjnymi właściwościami obrabiarki, wyrażonymi uzyskiwaną dokładnością obróbki przedmiotu obrobionego,
- umożliwiają dokonywanie zarówno sumarycznej jak i cząstkowej oceny własności statycznych, dynamicznych i geometrycznych obrabiarki oraz jakości powierzchni uzyskanej w procesie skrawania,
- wyrażane są czytelnie, w sposób ilościowy, w postaci liczb związanych z klasą dokładności wymiarów, które zarazem stanowią wartości odniesienia.

Należy też podkreślić, że istnieje możliwość odniesienia wyznaczanych odchyłek wymiarowych do wartości dopuszczalnych, określonych przez tolerancje wymiaru lub graniczne wartości odchyłek kształtu (por. tab. 4.2) lub chropowatości (por. tab. 4.1). Na każdym etapie wyznaczania sumarycznych lub cząstkowych wskaźników oceny istnieją również wartości odniesienia, w postaci liczbowych wartości, wyrażających klasy dokładności ISO.

5.3. ANALIZA ROZKŁADU OBCIĄŻEŃ W PRZESTRZENI ROBOCZEJ I STANÓW STRUKTURY

Pod opisem stanu obciążenia obrabiarki rozumiane są dane, określające:

- liczbę sił uogólnionych obciążających układ, związanych bezpośrednio i pośrednio z realizowanym procesem roboczym,
- współrzędne punktów zaczepienia i kierunki wektorów tych sił.

Rozpatrując zmienność stanu obciążenia, nie ma się zatem w niniejszych rozważaniach na uwadze zmienności wartości sił obciążających, lecz ich rozkład.

W czasie eksploatacji funkcje maszyny są realizowane przez określone cykle pracy, związane z ruchami względnymi elementów i zespołów. W wyniku tych ruchów, w czasie ich wykonywania, zmianie może ulegać zarówno struktura układu, jak i stan jego obciążenia. Zakresy tych ruchów wyznaczają, z jednej strony, zbiór struktur układu, jakie mogą występować podczas eksploatacji maszyny, z drugiej zaś zbiór możliwych punktów zaczepienia sił obciążających układ, związany z realizowanym procesem roboczym. Zbiór ten tworzy aktywną przestrzeń roboczą maszyny. Jej wykorzystanie w toku eksploatacji nie jest równomierne, w związku z tym rozkład obciążenia w przestrzeni roboczej nosi cechy asymetrycznego rozkładu stochastycznego.

Obszar, w którym może być realizowana obróbka, jest dla większości obrabiarek przestrzenią trójwymiarową. Analiza jego wykorzystania powinna obejmować statystyczne badania współrzędnych, opisujących w odpowiednim układzie współrzędnych, położenia umownego „punktu skrawania” odpowiadającego punktowi zaczepienia wypadkowej siły skrawania podczas obróbki typowych przedmiotów, przewidywanych do wytwarzania na danej obrabiarence. Znajomość tych przedmiotów i przebiegu planowanych zabiegów technologicznych umożliwia przeprowadzenie dyskretyzacji torów ruchu „punktu skrawania” i utworzenie reprezentatywnego, stosownie do stawianych zadań, trójwymiarowego rozkładu częstości występowania obciążenia w zadanych elementarnych obszarach przestrzeni roboczej obrabiarki. Na podstawie tego rozkładu określić można prawdopodobieństwo wystąpienia skrawania w określonym obszarze elementarnym, a tym samym nie tylko ustalić położenia zespołów roboczych obrabiarki, a także przypisać odpowiednią wagę w_{ijk} tym położeniom i wyznaczanym, przy tej konfiguracji struktury, wskaźnikom oceny.

Analiza przedmiotów obrabianych jest przeprowadzana od wielu lat i wykorzystywana w fazie wstępnego projektowania konstrukcji obrabiarki, w doborze rozmiarów przestrzeni roboczej lub w planowaniu inwestycji, środków wytwarzania i montażu [42, 45, 75, 91, 104, 148]. Utworzone zostały różnego rodzaju bazy danych, obejmujące przedmioty obrabiane na różnych obrabiarkach. Bazy te wykorzystuje się również do doboru, zgodnie z wymaganiami klientów, tzw. reprezentatywnych przedmiotów. Przedmioty te służą przede wszystkim jako odniesienie do konstrukcji oprzyrządowania, ale czasami dobiera się również tzw. „nietypowe przedmioty” [75], które są wykorzystywane w doborze układu konstrukcyjnego i napędu. Ta „nietypowość” polega na

przyjmowaniu jako reprezentatywnych przedmiotów o maksymalnych wymiarach, z ekstremalnymi żądaniami dotyczącymi parametrów obróbki.

Obecnie powszechnie tworzona jest na nośnikach elektronicznych dokumentacja konstrukcyjna i technologiczna, wykorzystywana w systemach komputerowo wsparte go konstruowania CAD i wytwarzania CAM. Obserwuje się rozwój systemów umożliwiających dobór obrabiarek, narzędzi i procesów na podstawie informacji o wymaganych tolerancjach wyrobów, które są umieszczone na rysunku konstrukcyjnym [149]. Nie istnieje jednak żaden znormalizowany system, który umożliwiłby wymianę informacji technologicznych, które należy wziąć pod uwagę w takim doborze [149]. Wydaje się, że włączenie „elektronicznej” dokumentacji konstrukcyjnej do istniejących baz danych przedmiotów obrabianych znacznie poszerzyłoby możliwości analizy. Bazy takie byłyby przydatne nie tylko w projektowaniu obrabiarek i elastycznych systemów produkcyjnych, ale mogłyby być również przydatne w rozwijanych procedurach oceny własności układów konstrukcyjnych obrabiarek, do wyznaczenia rozkładu występowania obciążenia w ich przestrzeni roboczej. Rozkład taki będzie wykorzystany w prezentowanej pracy do oceny własności obrabiarki w toku badań jej prototypu lub jej badań odbiorczych.

Podczas wykonywania analizy rozkładu obciążeń w przestrzeni roboczej obrabiarki należy uwzględnić sposoby mocowania przedmiotów obrabianych. Wpływają one na wymieniony rozkład w dwojaki sposób: wymuszają uwzględnienie w analizie tylko tych przedmiotów, które są mocowane w określony sposób oraz decydują o współrzędnych powierzchni obrabianych przedmiotów w analizowanym obszarze obróbki. Tak więc przyjęcie sposobu mocowania determinuje wybór z całego zbioru tylko tych przedmiotów, które spełniają kryterium mocowania, a później wpływa na wyniki przetwarzania zbioru wynikowego i na postać wyznaczonego rozkładu, stosownie do umieszczenia każdego przedmiotu w przestrzeni roboczej obrabiarki. Stosunek częstości korzystania z danego sposobu mocowania do całkowitej częstości występowania wszystkich odmian mocowania na danej obrabiarence stanowi prawdopodobieństwo wykorzystania tego mocowania w planowanych zabiegach technologicznych. Prawdopodobieństwa te będą stanowiły współczynniki wag w^M do wyznaczania wskaźników oceny konstrukcji obrabiarki, z uwzględnieniem wykorzystania różnych sposobów mocowania. Zestawienie czynników wpływających na rozkład częstości występowania obciążeń w przestrzeni roboczej obrabiarki przedstawiono na rysunku 5.5

Do wyznaczania rozkładu odmian mocowania służyć powinno obiektowo zorientowane oprogramowanie, które uwzględni nie tylko stosowane na obrabiarence uchwyty obróbkowe, lecz także jej specyfikę. W pewnych wypadkach, gdzie istnieje dużo możliwości umieszczenia oprzyrządowania mocującego w polu obróbki (np. imadło frezarskie), należy przyjąć pewną konwencję postępowania. Założyć można, przykładowo, zamocowanie przedmiotu w imadle, umieszczonym w środku suportu lub stołu, w położeniu wymagającym minimalnego wysięgu narzędzia, gdyż w tym przypadku wystąpią najmniejsze względne przemieszczenia między tym przedmiotem i narzędziem.



Rys. 5.5. Czynniki wpływające na rozkład częstości występowania obciążeń w przestrzeni roboczej obrabiarki

Fig. 5.5. Factors affecting the frequency distribution of the loads occurrence in the machine tool working space

Zakres zadań obróbkowych jest najważniejszym wyznacznikiem w poszukiwaniu funkcjonalnych cech i własności układów konstrukcyjnych obrabiarek oraz jest czynnikiem integrującym poszczególne fazy ich konstruowania [21]. Z analizy powierzchni przedmiotów, obrabianych na danej obrabiarence, można wyznaczyć rozkład obciążeń w jej przestrzeni roboczej, który umożliwi ustalenie stanów struktury układu konstrukcyjnego, reprezentatywnych ze względu na ocenę. W tym celu całą przestrzeń należy podzielić na elementarne obszary o kształtach zależnych od kierunków realizowanych ruchów roboczych elementów ruchowych obrabiarki. W przypadku frezarki np., elementarnymi obszarami są prostopadłościany, a dla tokarki prostokąty. Na bazie elementarnych obszarów ustala się rozkład częstości występowania obciążenia, biorąc pod uwagę wyselekcjonowaną w określony sposób grupę przedmiotów. Stosunek częstości zdarzeń w elementarnym obszarze obróbki do całkowitej liczby zdarzeń w całej rozpatrywanej przestrzeni roboczej stanowi prawdopodobieństwo wystąpienia skrawania w tym obszarze. Proponuje się jako reprezentatywne stany struktury przyjmować położenia elementów obrabiarki, odpowiadające środkowym punktom tylko tych elementarnych obszarów roboczych, w których wspomniane prawdopodobieństwa będą większe niż 5%. Pozostałe położenia mają niewielki wpływ na dokonywaną ocenę. W globalnych wskaźnikach oceny W_g jest więc wykorzystywane prawdopodobieństwo wystąpienia obciążenia w wybranych, reprezentatywnych obszarach roboczych, jako

współczynniki wag w_{ijk} dla wyznaczanych w tych miejscach wskaźników lokalnych W_{ijk} . Obowiązuje przy tym zależność

$$W_g = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} (w_{ijk} W_{ijk}) \quad (5.7)$$

w której: W_{ijk} – lokalny wskaźnik oceny w elementarnym obszarze $n_1 \times n_2 \times n_3$ -elementowej przestrzeni roboczej, dla określonego rodzaju obróbki, sposobu mocowania przedmiotu obrabianego i narzędzia, w_{ijk} – współczynnik wagi w elementarnym obszarze $n_1 \times n_2 \times n_3$ -elementowej przestrzeni roboczej, dla określonego rodzaju obróbki, sposobu mocowania przedmiotu obrabianego i narzędzia, n_1, n_2, n_3 – liczby elementów podziału przestrzeni roboczej w kierunkach osi 1, 2 i 3 przyjętego, trójwymiarowego układu współrzędnych.

W badaniach odbiorczych do ustalenia reprezentatywnego stanu struktury, konieczna jest znajomość maksimum rozkładu częstości występowania siły skrawania w przestrzeni roboczej obrabiarki. Przy jego wyborze trudności może sprawiać obecność kilku lokalnych maksimum tego rozkładu (przy zbyt gęstym podziale na elementarne obszary) lub występowanie niewielkich różnic częstości zliczeń w sąsiadujących obszarach elementarnych. W takiej sytuacji celowe wydaje się aproksymowanie rozkładu częstości typowym, wielowymiarowym rozkładem statystycznym z niesymetrycznym położeniem maksimum. Wymogi takie spełnia na przykład dwu- lub trójwymiarowy rozkład beta [7], ale trudności numeryczne sprawia czasami wyznaczenie jego parametrów.

Reasumując, określenie rozkładu obciążeń w przestrzeni roboczej obrabiarki wymaga obiektowo zorientowanego podejścia. W przypadku obrabiarek uniwersalnych do jego wyznaczenia konieczna jest znajomość wymiarów powierzchni obrabianych i sposobów zamocowania dużej liczby przedmiotów. W odniesieniu do obrabiarek zadaniowych i specjalnych wystarczą dane o powierzchniach obrabianych grupy typowych przedmiotów. Znajomość rozkładu występujących obciążeń stanowi kluczowy czynnik do wyznaczenia reprezentatywnych stanów struktury układu, przy których dokonuje się ocenę konstrukcji.

Obecnie istniejące bazy danych przedmiotów obrabianych są zbyt ubogie do wyznaczenia takiego rozkładu dla większości typów obrabiarek. W tej sytuacji, do czasu utworzenia takich baz, rozważyć można możliwość zastosowania teorii zbiorów rozmytych i wykorzystania wiedzy ekspertów w dziedzinie konstrukcji i badania obrabiarek do wypracowania stanowiska na temat reprezentatywnych rozkładów występowania obciążeń w przestrzeniach roboczych różnych maszyn. Znajomość tego typu rozkładów umożliwiłaby stosowanie zaproponowanej metody oceny w odniesieniu do różnych obrabiarek do czasu opracowania i wypełnienia konkretnymi danymi baz przedmiotów obrabianych. Podejście takie zaprezentowano w pracy [88], w której wprowadzono współczynniki wag do określenia „ważności” analizowanego wariantu konfiguracji struktury układu dynamicznego frezarki ze względu na częstość wystąpienia skra-

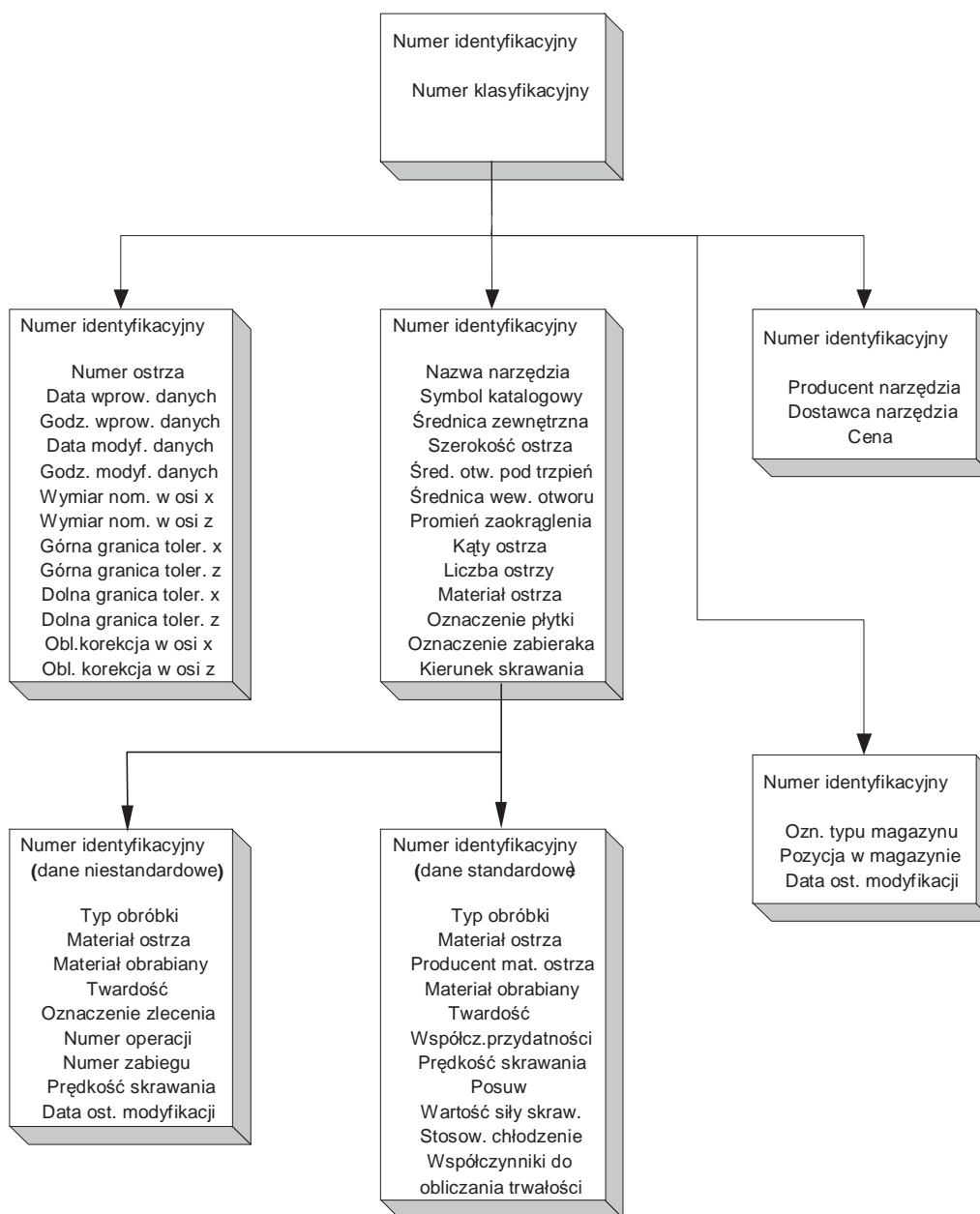
wania. Jednak jak sami autorzy podkreślają, wartości podane przez ekspertów są obciążone błędem wynikającym z ich subiektywnej oceny.

5.4. ANALIZA STOSOWANYCH NARZĘDZI ORAZ RODZAJÓW I PARAMETRÓW OBRÓBK

Nowoczesna gospodarka narzędziowa jest nadzorowana w zakładach produkcyjnych przez różne systemy komputerowe. Bazy danych, wchodzące w skład tych systemów, zarządzają rodzajem, wymiarami i geometrią narzędzi, właściwościami technologicznymi (zalecane parametry obróbki) i logistycznymi (producent, cena). Przykładową strukturę bazy danych dla typowych narzędzi [165] przedstawiono na rysunku 5.6. Programy oferowane przez producentów są najczęściej elektroniczną formą katalogu. Korzystanie z danych w systemie zarządzania gospodarką narzędziową w konkretnym przedsiębiorstwie wymaga najczęściej opracowania i wdrożenia modułu konwertującego je do formatu zgodnego ze stosowaną bazą. Nie jest bowiem obecnie możliwe opracowanie jednego, uniwersalnego systemu zarządzania narzędziami, który byłby możliwy do zastosowania w dowolnym, pod względem rodzaju i skali produkcji, przedsiębiorstwie [165]. Systemy zarządzania gospodarką narzędziami mają istotną wadę, którą jest zamknięta struktura oprogramowania [165]. Umożliwia ona realizowanie funkcji zarządzania narzędziami, ale tylko według własnych procedur i zbiorów danych.

Funkcje bazy danych wspomagają zewnętrzne systemy, np. MRP, które na podstawie planów obróbki generują listy narzędzi, koniecznych do realizacji danego zlecenia produkcyjnego. Możliwe zatem wydaje się zastosowanie tego typu systemów do ustalenia częstości wykorzystywania określonych narzędzi na danej obrabiarce. W innym wypadku należy dołączać do obiektowych baz danych przedmiotów obrabianych również odpowiednio sklasyfikowane dane o narzędziach wykorzystywanych w planowanych procesach technologicznych. Zarówno pierwszy, jak i drugi sposób pozyskiwania danych, dotyczących rozkładu narzędzi, wymaga podjęcia działań informatycznych umożliwiających dokonanie stosownej analizy.

Analiza narzędzi powinna być przeprowadzana jednocześnie z selekcją przedmiotów obrabianych, spełniających kryteria gabarytowe (w odniesieniu do przestrzeni roboczej obrabiarki) i sposobu zamocowania. Nie może być więc ona prowadzona w oderwaniu od planowanych i możliwych do wykonania, na danej obrabiarce, operacji technologicznych. Wynikiem tej analizy powinien być zbiór, określający częstość korzystania z poszczególnych narzędzi, z uwzględnieniem długości serii produkcyjnej obrabianych przedmiotów. Stosunek częstości korzystania z danego narzędzia do częstości korzystania ze wszystkich narzędzi na danej obrabiarce stanowi prawdopodobieństwo wykorzystania tego narzędzia w planowanych zabiegach technologicznych. Prawdopodobieństwa te będą stanowiły współczynniki wag w^N do wyznaczania wskaźników oceny konstrukcji obrabiarki, z uwzględnieniem wykorzystania różnych narzędzi.



Rys. 5.6. Struktura bazy danych typowych narzędzi skrawających

Fig. 5.6. Structure of a database of typical cutting tools

Podobnie można przyjąć i wyznaczyć współczynniki wag w^R związane z kolejnymi rodzajami zabiegów obróbkowych przeprowadzanych na danej obrabiarence.

Proponuje się, podobnie jak w przypadku rozkładu obciążeń, za reprezentatywne narzędzia i rodzaje obróbki przyjmować tylko te, w których wspomniane prawdopodobieństwa będą większe niż 5%. Pozostałe przypadki będą miały niewielki wpływ na dokonywaną ocenę. Przed rozpoczęciem procesu oceny wszystkie współczynniki wag należy znormalizować w taki sposób, aby ich suma wynosiła jeden (zależność (5.8)). Można to uzyskać przez podzielenie wstępnie przyjętych, reprezentatywnych współczynników wag (większych niż 0,05) przez ich sumę.

$$\sum_{n=1}^{n_R} w_n^R = 1, \quad \sum_{m=1}^{n_M} w_m^M = 1, \quad \sum_{l=1}^{n_N} w_l^N = 1, \quad \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} w_{ijk} = 1 \quad (5.8)$$

Ostatecznie globalny wskaźnik oceny W_g przyjmie zatem postać

$$W_g = \sum_{n=1}^{n_R} w_n^R \left\{ \sum_{m=1}^{n_M} w_m^M \left[\sum_{l=1}^{n_N} w_l^N \left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} w_{ijklmn} W_{ijklmn} \right) \right] \right\} \quad (5.9)$$

gdzie: w_{ijklmn} – współczynnik wagi dla elementarnego obszaru $n_1 \times n_2 \times n_3$ -elementowej przestrzeni roboczej, wyznaczony dla określonego n -tego rodzaju obróbki, m -tego sposobu mocowania i l -tego narzędzia,

w_n^R – współczynnik wagi, uwzględniający n -ty rodzaj obróbki,

w_m^M – współczynnik wagi, uwzględniający m -ty sposób mocowania przedmiotu obrabianego,

w_l^N – współczynnik wagi, uwzględniający l -ty rodzaj narzędzia,

W_{ijklmn} – lokalny wskaźnik oceny w elementarnym obszarze $n_1 \times n_2 \times n_3$ -elementowej przestrzeni roboczej, wyznaczony dla określonego n -tego rodzaju obróbki, m -tego sposobu mocowania i l -tego narzędzia,

n_R – liczba uwzględnionych rodzajów obróbki,

n_M – liczba uwzględnionych sposobów mocowania,

n_N – liczba uwzględnionych narzędzi.

Odbiorczy wskaźnik oceny W_o przyjmie odpowiednio postać

$$W_o = \sum_{n=1}^{n_R} w_n^R \left[\sum_{m=1}^{n_M} w_m^M \left(\sum_{l=1}^{n_N} w_l^N W_{lmn} \right) \right] \quad (5.10)$$

gdzie: W_{lmn} – lokalny wskaźnik oceny, wyznaczony w miejscu przestrzeni roboczej, odpowiadającym położeniu maksimum rozkładu obciążeń, dla określonego n -tego rodzaju obróbki, m -tego sposobu mocowania i l -tego narzędzia.

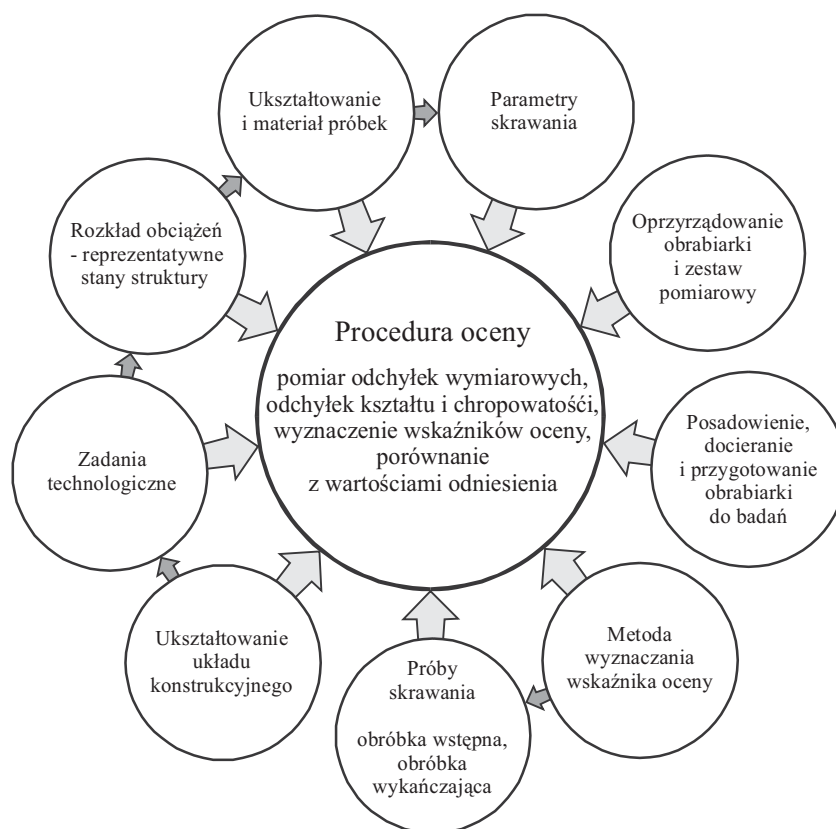
Parametry obróbki powinny być dobierane dla danych konkretnych narzędzi i rodzajów obróbki, zakładając, że przedmioty próbne wykonywane będą z dobrze skrawalnej stali 45 (uznanej za reprezentatywną) i poddane będą obróbce wykańczającej. Przy obróbce dokładnej usuwane są niewielkie warstwy materiału w celu nadania przedmiotowi dokładnych wymiarów i kształtu (z nierównościami nie przekraczającymi dopuszczalnej chropowatości powierzchni). Siły skrawania mają więc małe wartości, ze względu na małe przekroje warstwy skrawanej. Głębokości skrawania powinny być dobierane w zakresie naddatków pozostawianych na obróbkę dokładną. Posuw powinno ustalać się w zależności od dopuszczalnej chropowatości powierzchni obrabianej. Dla każdego reprezentatywnego narzędzia powinny być stosowane normatywne prędkości skrawania odpowiadające obróbce dokładnej. Zaleca się zatem przyjmować średnie wartości katalogowe prędkości skrawania, posuwu i głębokości skrawania, zalecane dla danego narzędzia i rodzaju obróbki, przyjęte dla obróbki wykańczającej. Przyjęcie narzędzia o konkretnej geometrii i wartości średnich parametrów obróbki determinuje samorzutnie wartość i kierunek wypadkowej siły skrawania. W połączeniu zaś z ustalonym rozkładem obciążeń (zestawem położeń punktów zaczepienia tej wypadkowej, związanym z obróbką próbek o ściśle określonych gabarytach), możliwe jest dokonanie oceny obrabiarki w warunkach obciążenia jej reprezentatywnymi siłami, występującymi w rzeczywistych warunkach ruchowych.

5.5. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA PROCEDURĘ OCENY WŁASNOŚCI OBRABIAREK

W warunkach badań doświadczalnych, na ogólną procedurę oceny własności obrabiarek, wpływa wiele czynników, zestawionych na rys. 5.7. Procedura ta jest ogólna, bo można ją odnieść do różnych typów obrabiarek, ale jej praktyczna realizacja wymaga dokonania obiektowo zorientowanego uszczegółowienia.

Analiza konstrukcji obrabiarki, przeprowadzana podczas dokonywania oceny jej własności, wymaga ustalenia kierunków głównych ruchów i rozmiarów przestrzeni roboczej. Stosownie do jej kształtu konieczne jest dokonanie podziału na elementarne obszary. Podział ten, dla kierunku uznanego za „wrażliwy”, ze względu na osiąganą dokładność wymiarową, powinien być zgodny z zakresami przedziałów wymiarów nominalnych. Dla pozostałych kierunków podział może być równomierny, ale niezbyt gęsty, gdyż zwiększyłoby to niepotrzebnie liczbę analizowanych obszarów, nie wpływając w znaczący sposób na dokładność analizy.

Analiza zadań technologicznych prowadzona powinna być w celu ustalenia sposobów mocowania przedmiotu i odmian obróbki na danej obrabiarce oraz określenia ich udziałów w programie produkcyjnym. Do oceny maszyny powinny być wykorzystane te odmiany obróbki i mocowania przedmiotu, które są dominujące. Niekiedy jest to jedno mocowanie lub jeden rodzaj obróbki, który uznany jest za reprezentatywny. Dla wybranych rodzajów obróbki należy przeanalizować stosowane w nich narzędzia



Rys. 5.7. Czynniki związane z procedurą oceny własności obrabiarek w badaniach pracą

Fig. 5.7. Factors concerned with the procedure for assessing machine tool properties in working tests

i podobnie ustalić kilka z nich, o największych udziałach w planowanych operacjach technologicznych lub przyjęć jedno narzędzie za reprezentatywne, dla którego dobrane są parametry skrawania.

Analiza rozkładu obciążeń powinna być prowadzona oddzielnie dla każdego z reprezentatywnych rodzajów obróbki, sposobów mocowania i narzędzi. Jej celem jest ustalenie częstości występowania obciążeń w każdym z ustalonych obszarów elementarnych. Służy to do określenia prawdopodobieństwa występowania w tych obszarach położenia zespołów obrabiarki. Za reprezentatywne stany struktury przyjmuje się położenia odpowiadające tylko tym obszarom, dla których stwierdzono największe prawdopodobieństwa. Pozwala to ograniczyć liczbę analizowanych przypadków. Do celów badań odbiorczych wyznacza się współrzędne maksimum rozkładu występowania obciążeń i odpowiadające mu położenia zespołów obrabiarki, a wskaźniki oceny wyznacza się tylko w jednym miejscu przestrzeni roboczej. Do realizacji analizy tego rozkładu konieczne jest dysponowanie bazą danych przedmiotów, możliwych do wykonania

na danej obrabiarence. Dane o powierzchniach obrabianych przedmiotów mogą posłużyć do aproksymacji dyskretnego rozkładu obciążeń ciągłym rozkładem wielowymiarowym, posiadającym ekstremum, które jest łatwe do wyznaczenia na drodze obliczeniowej. W przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie, do analizy rozkładu obciążeń można korzystać z zestawu programów obróbkowych dla przedmiotów, które będą wykonywane na ocenianej obrabiarence. Takie postępowanie wymaga jednak opracowania oprogramowania do konwersji danych o powierzchniach obrabianych.

Zaprojektowanie i wykonanie zestawu próbek jest kolejnym etapem procedury oceny. Jako typowy materiał przyjmuje się stal 45. Gabaryty próbek powinny być dostosowane do sposobu mocowania w taki sposób, aby umożliwić skrawanie w pobliżu środka każdego z reprezentatywnych obszarów elementarnych, lub w jednym wyznaczonym miejscu, w odniesieniu do próbki stosowanej w badaniach odbiorczych. Jeśli wymaga tego przyjęty sposób mocowania lub stosowana obróbka, to próbki powinny mieć wykonane otwory technologiczne. W odniesieniu do oceny własności statycznych obrabiarki należy wykonać dodatkowe próbki, o skokowo zmieniającym wymiarze w kierunku uznanym dla danego typu obrabiarki za „wrażliwy” (najczęściej kierunek normalny do powierzchni obrabianej), które umożliwią realizację różnych wartości obciążenia.

Dobór parametrów skrawania powinien uwzględniać wcześniej przyjęte reprezentatywne narzędzia do skrawania stali 45. Parametry te należy przyjąć jako średnie wartości na podstawie danych katalogowych odpowiadających obróbce wykańczającej. Stosownie do gabarytów próbki lub narzędzia oraz możliwych nastaw badanej obrabiarki dobrać należy odpowiednie parametry obróbki dla każdego z reprezentatywnych obszarów elementarnych. W badaniach własności statycznych obrabiarki zwiększać należy głębokość skrawania, ale jedynie do wartości nie powodujących utraty stabilności procesu skrawania.

Opryżądowanie pomiarowe powinno umożliwiać pomiar odchyłek wymiarowych, odchyłek kształtu i położenia oraz chropowatości przedmiotu obrabianego. W skład opryżądowania musi wchodzić tradycyjny sprzęt mierniczy do pomiaru analizowanych wymiarów. Jeżeli umożliwiają to warunki, pomiary powinny być przeprowadzone w laboratorium pomiarowym. Jeśli nie jest to możliwe ze względu na ciężar i gabaryty przedmiotu obrabianego (przekroczenie nośności przyrządów pomiarowych lub rozmiarów przestrzeni pomiarowej), badania mogą być wykonane na obiekcie, przy czym opryżądowanie musi być dostosowane indywidualnie do danego typu obrabiarki. W pewnych przypadkach do pełnej oceny błędów kształtu nie wystarcza sprzęt uniwersalny, gdyż nie zapewnia on dostatecznie długich odcinków pomiarowych. Czasem może być konieczne odejście od znormalizowanych definicji wielkości, np. w przypadku falistości. Zwrócić należy jednak uwagę, że parametry opisujące jakość powierzchni bardzo zależą od przyjętego odcinka pomiarowego, nawet wtedy, gdy powierzchnie są bardzo homogeniczne [158].

Oprogramowanie do wyznaczania wskaźnika powinno być przygotowane przed badaniami. Jego struktura zależy tylko od postaci przestrzeni roboczej obrabiarki. Dzia-

łanie oprogramowania sprowadza się do policzenia średnich ważonych wartości wskaźników oceny z uwzględnieniem współczynników wag wyznaczonych w toku analizy zadań technologicznych i rozkładu obciążeń obrabiarki. Współczynniki te określają prawdopodobieństwo wystąpienia obciążenia w zadanym polu przestrzeni roboczej i prawdopodobieństwa stosowania odpowiedniego sposobu obróbki, narzędzia lub rodzaju mocowania przedmiotu.

Kolejne etapy procedury oceny wymagają już istnienia obiektu w sensie fizycznym. **Posadowienie i docieranie obrabiarki** musi się odbyć zgodnie z warunkami dokumentacji techniczno–ruchowej. Przygotowanie maszyny do badań powinno obejmować nagrzewanie na biegu jałowym przez okres 0,5 h w celu uzyskania stabilizacji cieplnej maszyny i ustalenia luzów roboczych. Nagrzewanie należy przeprowadzić przy włączonym napędzie głównym z parametrami odpowiadającymi 75% wartości maksymalnej prędkości obrotowej lub posuwowej. W jego trakcie można przeprowadzić pomiar odkształceń termicznych obrabiarki. Każda próba obróbkowa powinna być poprzedzona pracą obrabiarki na biegu jałowym z parametrami ruchu głównego odpowiadającymi nastawom stosowanym w tej próbie.

Dla każdego z rodzajów obróbki, narzędzi i sposobów mocowania, które zostaną przyjęte jako reprezentatywne, przeprowadzić należy kolejno **próby obróbkowe**. Próby te realizuje się przy stanach struktury określonych jako reprezentatywne, stosując parametry obróbki ustalone we wcześniejszym etapie procedury oceny. Powierzchnię każdej próbki poddać należy wstępnej obróbce w celu jej przygotowania do prób skrawaniowych. Na powierzchni próbki wykonać należy kilka stopni odpowiadających różnym głębokościom skrawania w kierunku uznanym za „wrażliwy”. Posłużą one do wyznaczenia odchyłki wymiaru, związanej z własnościami statycznymi układu konstrukcyjnego. Próbnny przedmiot obrabiany należy poddać kilku próbom skrawaniem (w obszarze analizowanego obszaru elementarnego), stosując parametry odpowiadające obróbce wykańczającej. Po próbach przeprowadzić należy pomiar wymiarów stopniowanej części próbki i wyznaczyć odchyłki od wymiaru nominalnego (powierzchni bazowej), które wynikają z odkształceń statycznych układu. Ostatnim etapem każdej próby jest kilkakrotny pomiar profilu powierzchni w miejscu odpowiadającym skrawaniu z głębokością równą średniej wartości katalogowej, zalecanej dla obróbki wykańczającej. W jego efekcie powinny zostać wyznaczone parametry chropowatości powierzchni i odchyłki kształtu.

Ostatnim etapem procedury jest **wyznaczenie wskaźnika oceny**, z wykorzystaniem opracowanego oprogramowania. Ten etap wymaga zebrania wszystkich danych pomiarowych i sformalizowanego zapisania ich w pliku, który jest odczytywany przez program komputerowy. Wyznaczone wskaźniki można odnosić do klas dokładności ISO i do wymagań postawionych przez konstruktora. Wskaźniki mogą też służyć do porównywania obrabiarek tego samego typu, gdyż pozwalają wskazać na to, która z nich jest lepsza (mniejsza wartość wskaźnika).

Badania odbiorcze obrabiarek można zrealizować również według powyższej procedury oceny. Próby skrawaniowe przeprowadza się w tym przypadku dla każdej z kon-

figuracji układu konstrukcyjnego, która odpowiada maksimum rozkładu występowania obciążeń w przestrzeni roboczej. Rozkłady takie są wyznaczone dla każdej kombinacji, spośród przyjętych za reprezentatywne, sposobów obróbki, mocowania i rodzajów narzędzi.

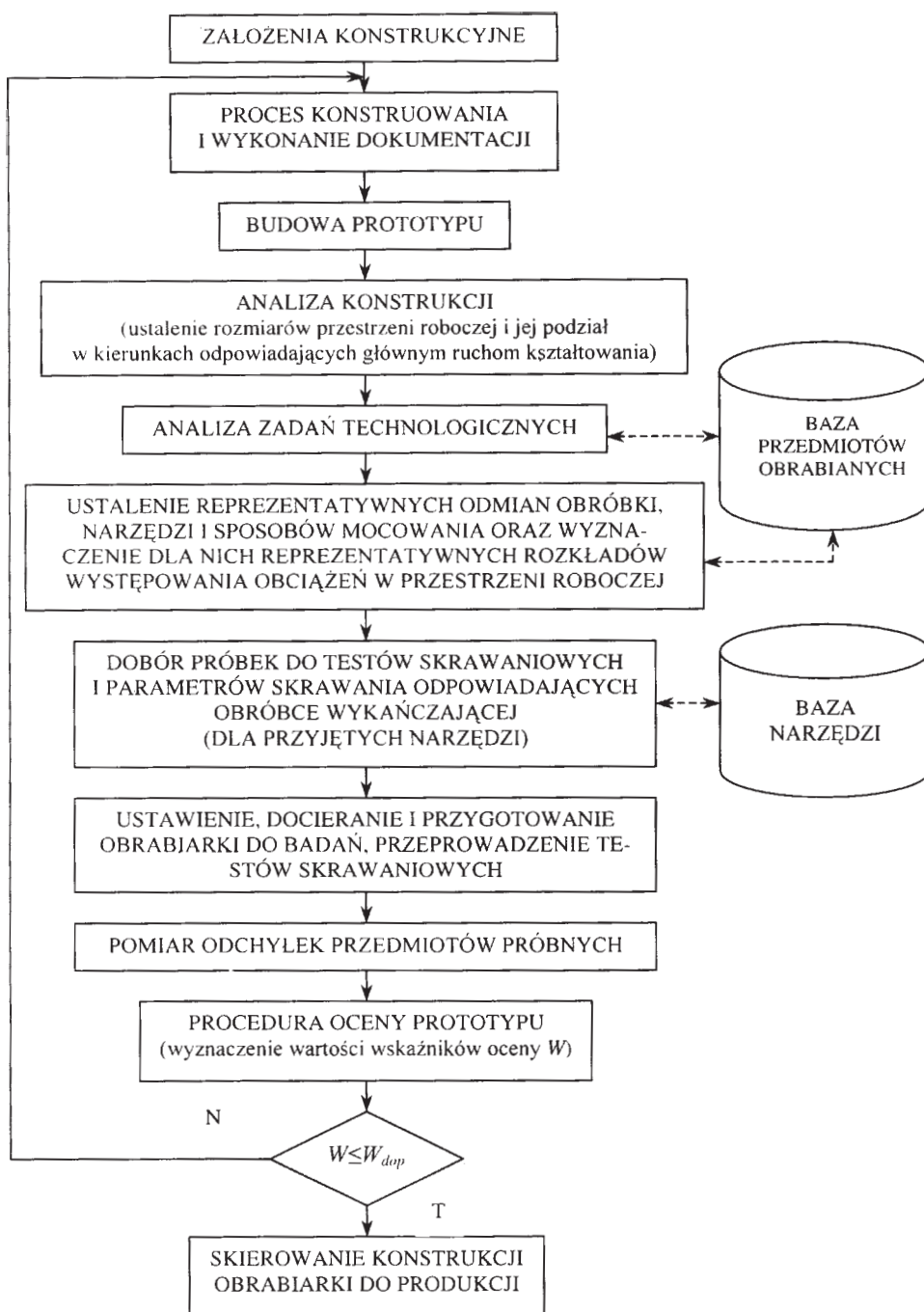
5.6. WYZNACZANIE WSKAŹNIKÓW OCENY WŁASNOŚCI W BADANIACH PROTOTYPU

W procedurze oceny własności prototypu obrabiarki należy uwzględnić wszystkie czynniki wymienione w rozdziale 5.5. Umieszczenie opracowanej metody oceny w badaniach prototypu przedstawia rysunek 5.8. Szczególne miejsce w procedurze oceny zajmuje baza przedmiotów obrabianych, która dostarcza podstawowych danych o realizowanych zadaniach obróbkowych. Na jej podstawie są ustalane reprezentatywne odmiany obróbki, narzędzi i sposobów mocowania, dla których wyznaczone są znormalizowane współczynniki wag. Baza przedmiotów obrabianych jest również podstawą do wyznaczenia częstości występowania obciążeń w przestrzeni roboczej i odpowiadających temu rozkładowi znormalizowanych współczynników wag. Reprezentatywne stany struktury obrabiarki odpowiadają takim wzajemnym położeniom zespołów obrabiarki, dla których występują niezerowe wagi w przyjętych elementarnych obszarach całego pola obróbki. Dla każdego z tych stanów wykonywane są próbki z przyjętego materiału, których gabaryty, z uwzględnieniem sposobu mocowania, powinny umożliwić osiągnięcie odpowiedniej konfiguracji struktury.

Parametry skrawania są dobierane na podstawie danych katalogowych przyjętych narzędzi. Odpowiadają one średnim wartościom katalogowym dla obróbki wykańczającej, prowadzonej dla każdego z przyjętych rodzajów obróbki, z użyciem każdego z przyjętych narzędzi. Po ustawieniu i przeprowadzeniu docierania obrabiarki, realizowane są testy skrawaniowe, po których odbywa się pomiar odchyłek wymiarów i kształtu oraz chropowatości powierzchni przedmiotów próbnych. Zmierzone odchyłki są podstawą do wyznaczenia wskaźników oceny W . Wskaźniki W są porównywane z wartościami odniesienia W_{dop} , które stanowią wartości liczbowe granicznej klasy dokładności, odpowiadającej realizowanej na prototypie obróbce wykańczającej. W trakcie badań prototypu można wyznaczać również cząstkowe wskaźniki, odnoszące się do oceny wpływu własności statycznych, dynamicznych i geometrycznych tej obrabiarki lub procesu skrawania na osiąganą dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotu obrabianego.

Pomyślny przebieg badań prototypu jest podstawą do skierowania obrabiarki do produkcji. Niespełnienie kryterium osiąganego dokładności wykonania przedmiotów próbnych wymaga przeprowadzenia zmian konstrukcyjnych i powtórzenia procedury oceny.

W trakcie badań odbiorczych stosuje się podobną procedurę oceny, jak podczas badań prototypu, ale jest ona znacznie uproszczona. Dla każdej z reprezentatywnych odmian obróbki, każdego z reprezentatywnych narzędzi i sposobów mocowania przedmiotu wyznacza się jeden stan struktury, odpowiadający położeniu maksimum



Rys. 5.8. Struktura badań prototypu z uwzględnieniem opracowanej metody oceny obrabiarek
 Fig. 5.8. Structure of the prototype testing adopting the developed method for evaluating machine tools

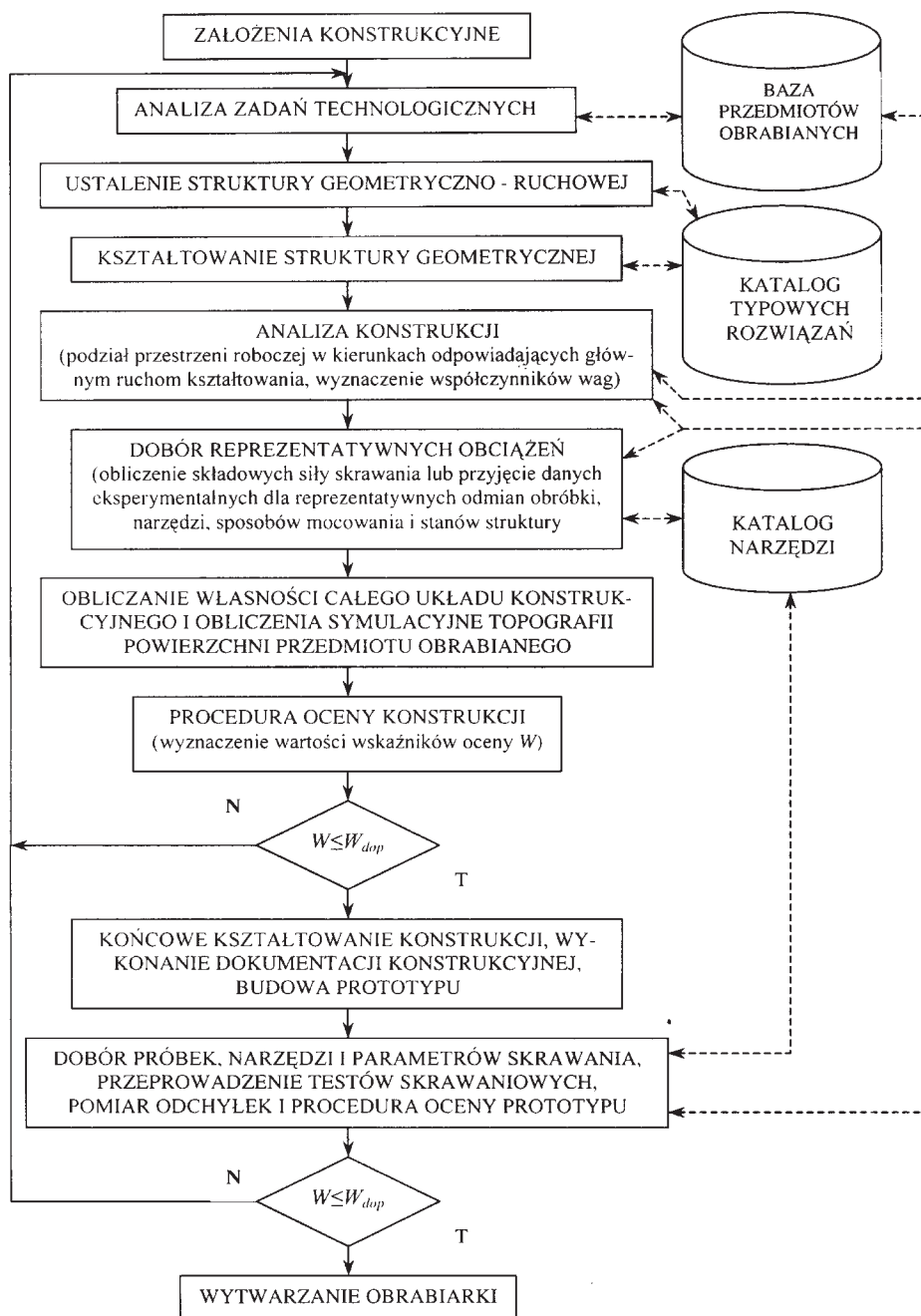
częstości występowania obciążeń roboczych. Dla każdego z tych stanów wykonuje się próbki i przeprowadza próby skrawaniowe, zachowując pozostałe warunki takie same, jak w badaniach prototypu (por. rys. 5.8). Różnica dotyczy skutków przeprowadzanej oceny. Obrabiarka nie spełniająca kryterium osiągniętej dokładności nie powinna zostać odebrana przez użytkownika.

5.7. WYZNACZANIE WSKAŹNIKÓW OCENY WŁASNOŚCI OBRABIAREK W TOKU KONSTRUOWANIA

Jedną z głównych przyczyn braku spójności między poszczególnymi fazami konstruowania jest brak podstawowych metod i opartych na CAD narzędzi, służących do zapisu zadań obróbkowych, które są podstawą do opracowania założeń konstrukcyjnych i do ostatecznego kształtowania rozwiązania obrabiarki [21]. Prezentowana praca uwzględnia, w modelu oceny, rozkład obciążeń w przestrzeni roboczej obrabiarki. Jest on wyznaczany na podstawie analizy zadań technologicznych, wyrażonych przez spektrum powierzchni obrabianych przedmiotów, które planuje się na tej maszynie wytwarzać. Tak więc proponowana metoda oceny powinna stanowić spójne ogniwo poszczególnych faz procesu konstruowania obrabiarek. Na rysunku 5.9 pokazano łączne umiejscowienie opracowanej metody oceny w procedurze konstruowania obrabiarki i w badaniach prototypu, które stanowią uwieńczenie przejścia wszystkich faz konstruowania.

Istniejące obecnie metody obliczeniowe [21, 58, 65, 72, 86, 87, 144, 155] są stosowane podczas konstruowania przede wszystkim do modelowania struktury geometryczno-ruchowej obrabiarki i do weryfikacji własności poszczególnych układów funkcjonalnych (np. korpusów nośnych, połączeń stałych i prowadnicowych, zespołów wrzecionowych, układów napędowych). Ocena rozwiązań konstrukcyjnych odbywa się na podstawie kryteriów intuicyjnych, a także przez analizę porównawczą z podobnymi rozwiązaniami lub ich wariantami. Metody obliczeniowe wykorzystywane do symulacji topografii powierzchni obrabianych są przeznaczone do analizowania skutków oddziaływań kinematycznych układów posuwowych [11–13], drgań zespołów obrabiarki [77] lub do przewidywania dokładności kształtowej przedmiotów obrabianych [63, 80, 138]. Metody te uwzględniają czynniki związane z realizacją procesu skrawania. Symulacja taka nie jest jednak standardowym narzędziem, stosowanym w procesie projektowania.

W metodach symulacyjnych należy zwrócić uwagę na to, że niektóre prace mylnie utożsamiają odchyłki kształtu przedmiotu obrobionego z przemieszczeniami tego przedmiotu, wywołanymi statycznymi odkształceniami zespołów obrabiarki. Zastosowana w pracy [21] tzw. „metoda symulacji obróbki” nie uwzględnia własności układu narzędziowego, napędu i procesu skrawania. Ze względu na kluczową rolę odchyłek wymiarowych przedmiotu obrabianego w procedurze oceny obrabiarki, celowe jest połączenie metod obliczeniowych związanych z wyznaczaniem własności całego ukła-



Rys. 5.9. Ogólna struktura procesu konstruowania z uwzględnieniem opracowanej metody oceny obrabiarek

Fig. 5.9. General structure of the design process considering the developed method for evaluating machine tools

du konstrukcyjnego obrabiarki z metodami symulacji topografii powierzchni obrabianych. Zintegrowanie obu rodzajów metod obliczeniowych jest warunkiem koniecznym do spełnienia, jeśli opracowana metoda oceny miałaby zostać włączona do procedur projektowania obrabiarek.

Włączenie opracowanej metody oceny do procedur projektowania obrabiarek miałyby wiele zalet. Godna podkreślenia byłaby spójność tej metody z procesem konstruowania, polegająca na korzystaniu ze wspólnych danych, wynikających z analizy zadań obróbkowych i wspólnych, czytelnych wartości odniesienia w postaci klasy osiągniętej dokładności wymiarowo-kształtowej przedmiotu obrabianego. Kolejną zaletą byłaby spójność metod oceny stosowanych w toku konstruowania i w badaniach prototypu lub odbiorczych, co przejawiałoby się w korzystaniu z tych samych, reprezentatywnych stanów struktury, rodzajów obróbki, sposobów mocowania i stosowanych narzędzi. Obciążanie modelu wirtualnego i układu rzeczywistego odbywałoby się w tych samych warunkach, z zastosowaniem porównywalnych obciążeń. Składowe siły skrawania, jakie należałoby zastosować w modelu obliczeniowym można wyznaczyć na podobnej obrabiarkie, korzystając z przyjętego materiału, narzędzia i parametrów obróbki, a więc bez konieczności budowy prototypu. Włączenie metody oceny do procesu konstruowania obrabiarek uprościłoby przygotowanie badań prototypu, gdyż wiele czynności przygotowawczych (analiza zadań technologicznych, analiza konstrukcji, dobór reprezentatywnych stanów struktury, dobór obciążeń roboczych) wykonywanych byłoby w fazie projektowania.

Podsumowując, można stwierdzić, że opracowana metoda oceny własności obrabiarek daje konstruktorowi narzędzie umożliwiające podejmowanie racjonalnych decyzji na podstawie jednoznacznej, obiektywnej oceny cech konstrukcyjnych i funkcjonalnych obrabiarki. Ocena może być przeprowadzana zarówno podczas procesu projektowania, jak i badań prototypu lub testów odbiorczych. Metoda jest obiektowo zorientowana, gdyż wymaga opracowania szczegółowego sposobu pomiaru odchyłek przedmiotu obrabianego w odniesieniu do każdego typu obrabiarki, uwzględniając spektrum stawianych tej maszynie zadań obróbkowych. Odnosi się to do określanych każdorazowo reprezentatywnych rodzajów obróbki, mocowania, narzędzi i rozkładów częstości występowania obciążeń roboczych.

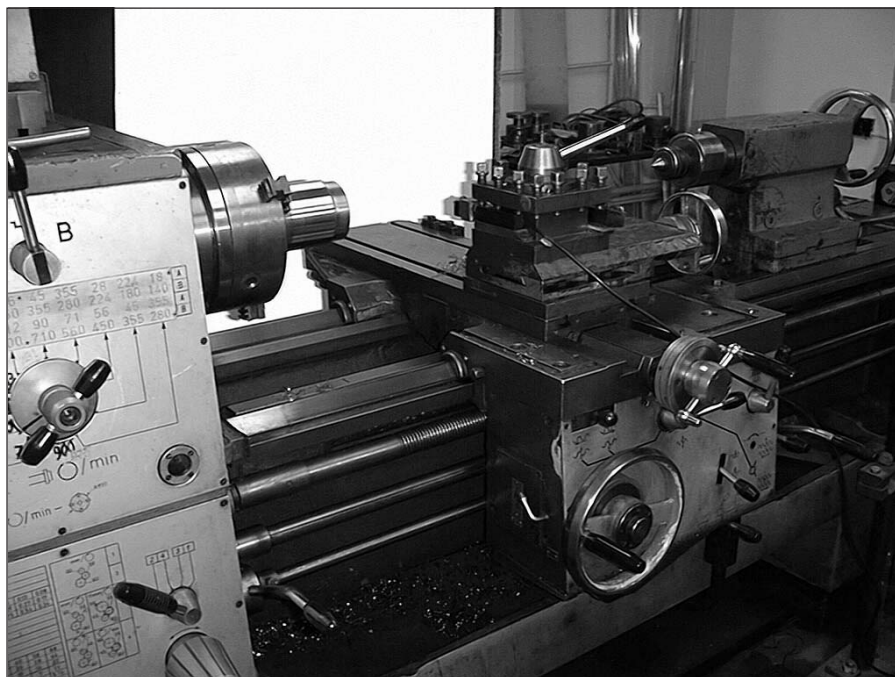
6. WERYFIKACJA METODY OCENY

6.1. OPIS OBIEKTU BADAŃ

Obiektem, na którym testowano metodę oceny, była tokarka uniwersalna średniej wielkości TUR 50, produkcji Fabryki Automatów Tokarskich we Wrocławiu. Moc napędu dwubiegowego silnika napędu głównego tej tokarki wynosiła 7,5/11 kW, a zakres prędkości obrotowych wrzeciona od 18 do 1800 obr/min. Posuwy wzdłużne mieściły się w zakresie od 0,08 do 3,26 mm/obr. Średnica przelotu nad łożem wynosiła 500 mm, a nad suportem poprzecznym 315 mm. Maksymalny rozstaw kłów umożliwiał obróbkę przedmiotów o długości 1500 mm. Przestrzeń robocza tej tokarki miała zatem wymiary: 250 mm w kierunku promieniowym (licząc od osi wrzeciona) i 1500 mm w kierunku osiowym (licząc od powierzchni czołowej końcówki wrzeciona).

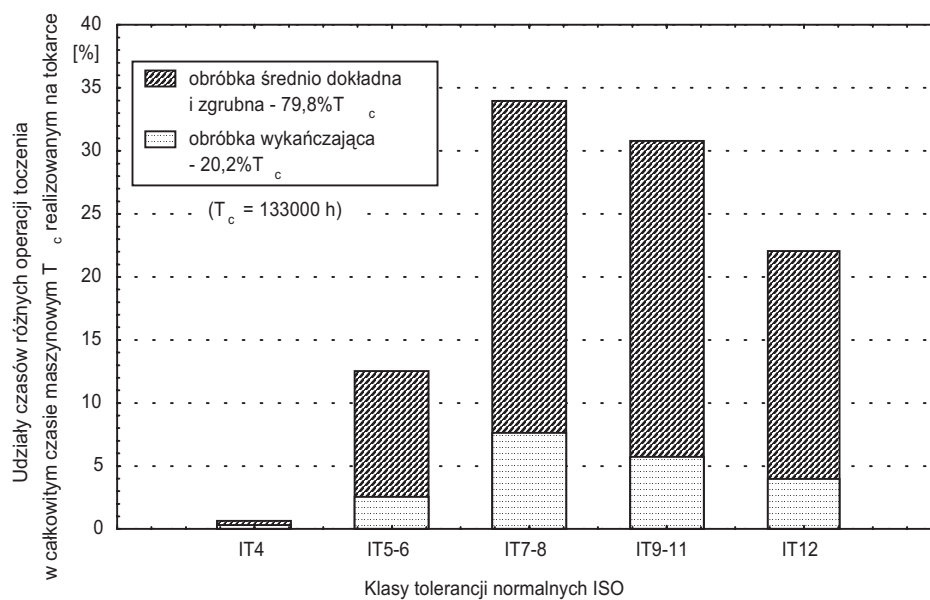
Tokarka TUR 50 umożliwia wykonywanie wszystkich operacji przewidzianych dla maszyn uniwersalnych tego typu, a więc przeprowadzanie toczenia wzdłużnego, poprzecznego i stożków (dla powierzchni zewnętrznych i wewnętrznych) oraz na osiowe wiercenie i wykonywanie gwintów. Jej zakres zastosowań obejmuje obróbkę dużej gamy przedmiotów, ale o jednostkowym charakterze produkcji.

Wymagania związane z dokładnością obróbki uzyskiwanej na tokarkach mieszczą się dla wszystkich wykonywanych operacji w przedziale klas ISO od IT5 do IT12 (rys. 6.2.) [104]. Dominują zadania technologiczne związane z obróbką zgrubną i średnio dokładną (80%), dla których IT12 jest klasą graniczną, odnoszącą się do wymiarów nietolerowanych. Dla obróbki wykańczającej, a ta będzie stosowana podczas oceny własności badanej tokarki, najwięcej jest przedmiotów wykonywanych w klasach dokładności IT7-IT8, chociaż występuje też 3% grupa przedmiotów bardzo dokładnych, wykonanych w klasach ISO IT5-IT6 i 4% grupa przedmiotów mało dokładnych (jak na obróbkę na gotowo), wykonywanych w klasie ISO IT12. Biorąc pod uwagę, że dane służące do przeprowadzenia analizy operacji toczenia zebrano ponad trzydzieści lat temu, można się obecnie liczyć z nieznacznym przesunięciem rozkładu, przedstawionego na rysunku 6.2, w kierunku większych dokładności i z większą liczbą przedmiotów obrabianych na gotowo. Wiąże się to głównie z postępem w dziedzinie stosowanych materiałów narzędziowych oraz ze zmianami konstrukcyjnymi tokarek, umożliwiającymi realizację obróbki z bardzo dużymi prędkościami skrawania.



Rys. 6.1. Tokarka TUR 50

Fig. 6.1. TUR50 lathe



Rys. 6.2. Wymagane dokładności operacji toczenia (dane z 19 zakładów przemysłowych [104])

Fig. 6.2. Required accuracy of turning operations (data from 19 factories [104])

6.2. BAZA DANYCH PRZEDMIOTÓW OBRABIANYCH I JEJ FUNKCJE

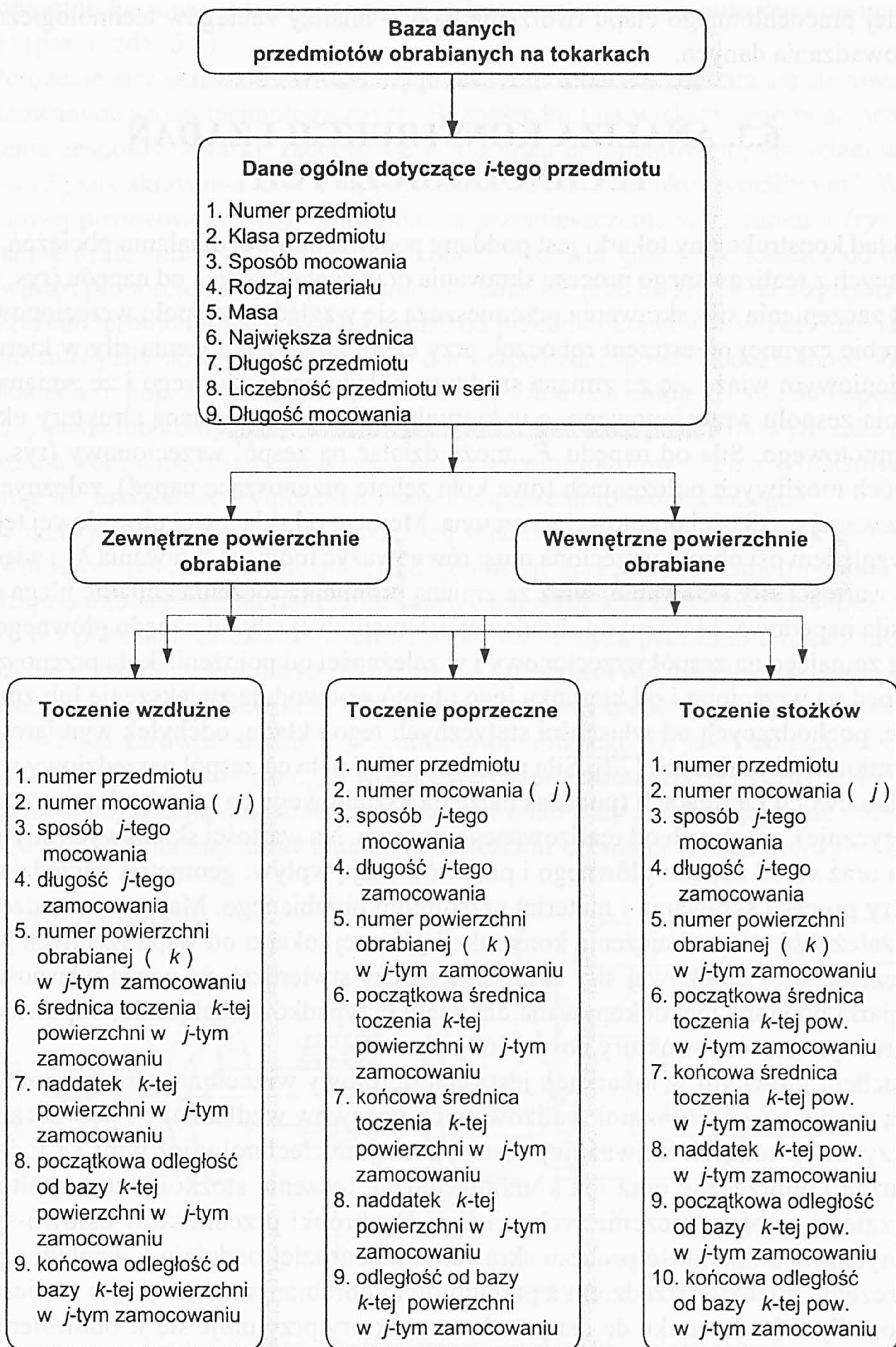
Na potrzeby analizy zadań obróbkowych tokarek zbudowana została baza danych, obejmująca 1962 różne przedmioty osiowo-symetryczne [65, 66, 69, 70, 131], produkowane przede wszystkim seryjnie. Łączna ich liczebność, z uwzględnieniem liczby sztuk w seriach, wynosiła ponad 380 000. Statystyczne dane, dotyczące przedmiotów, zebrano w biurach technologicznych czterech zakładów przemysłu maszynowego i zapisano na specjalnych kartach [66]. Strukturę tej bazy zorganizowano zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 6.3. Baza ta zawierała dwa typy danych: ogólne o przedmiotach i szczegółowe, opisujące poszczególne powierzchnie obrabiane.

W celu skrócenia czasu dostępu do informacji i zmniejszenia objętości bazy, a tym samym zwiększenia szybkości jej obsługi, podzielono ją na siedem mniejszych zbiorów relacyjnych, powiązanych ze zbiorem głównym. W zbiorze głównym zawarto wszystkie dane ogólne opisujące przedmiot, a więc jego numer w bazie, liczebność serii, klasę, rodzaj materiału i gabaryty. Kryterium podziału bazy na pozostałe podzbiory był rodzaj obrabianej powierzchni i sposób toczenia. Dla rozróżnienia przypadków toczenia powierzchni wewnętrznych i zewnętrznych utworzono oddzielne zbiory dla toczenia wzdłużnego, poprzecznego i stożków (łącznie 6 zbiorów). Każdy ze wspomnianych podzbiorów zawierał następujące dane: numer przedmiotu, liczbę mocowań, sposoby mocowania, liczbę obrabianych powierzchni (dla każdego mocowania) i ich wymiary. Dla ułatwienia zadawania danych i ich późniejszego przetwarzania niektóre z nich zakodowane zostały w zbiorze głównym w postaci indeksów.

Baza danych realizowała następujące funkcje:

- umożliwiała wprowadzanie danych ogólnych o przedmiocie do zbioru głównego i szczegółowych do zbiorów pomocniczych,
- pozwalała na aktualizację danych w zakresie ich korekty lub usuwania ich ze zbiorów aktywnych (z jednoczesnym kopiowaniem do zbiorów historycznych),
- umożliwiała przeglądanie danych według wybranych numerów przedmiotów (w zbiorach aktywnych i historycznych),
- zasadnicza jej funkcja umożliwiała dokonywanie selekcji przedmiotów obrabianych według wybranych kryteriów i na przygotowanie zbiorów wynikowych do dalszych analiz obliczeniowych, następnie wyznaczanie rozkładu częstości występowania obciążeń w przestrzeni roboczej.

Utworzona baza ma strukturę otwartą, która umożliwia wprowadzanie danych nowych przedmiotów. Do rozszerzania jej przydatne mogą być programy obróbki na obrabiarki sterowane numerycznie, z których można, drogą odpowiedniego oprogramowania, wczytać odpowiednie rekordy opisujące kolejne operacje technologiczne. W przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie, centrów obróbkowych lub elastycznych systemów produkcyjnych, dla których muszą istnieć takie dane, można by było w ten sposób bardzo znacznie skrócić czas analizy rozkładu obciążeń, dzięki eliminacji naj-



Rys. 6.3. Struktura bazy danych przedmiotów obrabianych na tokarkach

Fig. 6.3. Structure of a database for turned workpieces

bardziej pracochłonnego etapu tworzenia bazy – analizy zabiegów technologicznych i wprowadzania danych.

6.3. ANALIZA KONSTRUKCJI I ZADAŃ TECHNOLOGICZNYCH

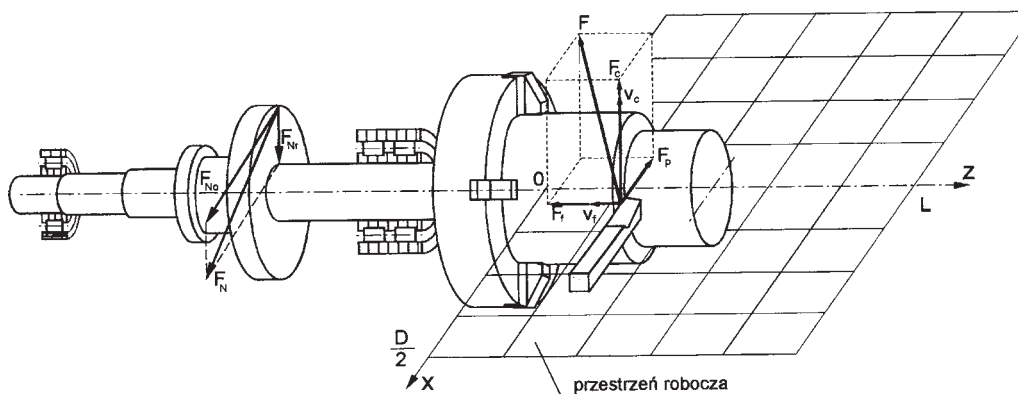
Układ konstrukcyjny tokarki jest poddany podczas obróbki działaniu obciążeń, wynikających z realizowanego procesu skrawania oraz pochodzących od napędu (rys. 6.4). Punkt zaczepienia siły skrawania przemieszcza się względem zespołu wrzecionowego w obrębie czynnej przestrzeni roboczej, przy czym zmiana położenia siły w kierunku promieniowym wiąże się ze zmianą struktury układu narzędziowego i ze zmianą obciążenia zespołu wrzecionowego, a w kierunku osiowym ze zmianą struktury układu przedmiotowego. Siła od napędu F_N może działać na zespół wrzecionowy (rys. 6.4) w dwóch możliwych położeniach (dwa koła zębate przenoszące napęd), zależnych od realizowanej prędkości obrotowej wrzeciona. Moment od składowej obwodowej tej siły F_{No} względem osi obrotu wrzeciona musi równoważyć moment skrawania M_c , więc dla stałej wartości siły skrawania, wraz ze zmianą promienia toczenia zmianie ulega również siła napędowa. Moment od składowej promieniowej siły od napędu głównego F_{Nr} działa zginająco na zespół wrzecionowy i w zależności od położenia koła przenoszącego napęd na wrzeciono i od kierunku jego obrotów powoduje zwiększenie lub zmniejszenie, pochodzących od własności statycznych tego układu, odchyłek wymiarowych przedmiotów obrabianych [72]. Siła posuwowa F_f działa na zespół narzędziowy w jednym lub dwóch kierunkach (podczas toczenia kształtowego na tokarkach sterowanych numerycznie), zależnych od realizowanego posuwu. Na wartości składowych siły skrawania oraz sił od napędu głównego i posuwów mają wpływ: geometria narzędzia, parametry procesu skrawania i materiał przedmiotu obrabianego. Mając na uwadze złożoną zależność stanu obciążenia konstrukcji głównej tokarki od współrzędnych punktu zaczepienia wypadkowej siły skrawania należy stwierdzić, że ocena własności tej obrabiarki powinna być dokonywana dla wielu przypadków obciążenia, odpowiadających różnym stanom struktury nośnej [69].

Ruchem głównym w tokarkach jest ruch obrotowy wrzeciona, a ruchy pomocnicze są związane z kierunkami realizowanych posuwów wzdłużnego i poprzecznego. W przypadku tokarek najważniejszymi operacjami technologicznymi są toczenie wzdłużne i poprzeczne oraz ich kombinacje (np. toczenie stożków lub kształtowe). Ze względu na przeznaczenie tych maszyn do obróbki przedmiotów osiowo-symetrycznych, na dokładność procesu skrawania najbardziej oddziałują względne przemieszczenia między narzędziem a przedmiotem obrabianym zachodzące w kierunku prostopadłym (w stosunku do osi przedmiotu), który przyjmuje się w odniesieniu do tokarek jako „wrażliwy” [156]. Wszelkie oceny dokładności wymiarowo-kształtowej toczonego przedmiotu powinny więc dotyczyć tego kierunku. Również podział przestrzeni roboczej podczas analizy wymiarów powierzchni obrabianych powinien być

dokonany w kierunku promieniowym zgodnie z zakresami wymiarów nominalnych [186] (por. rozdz. 5.5).

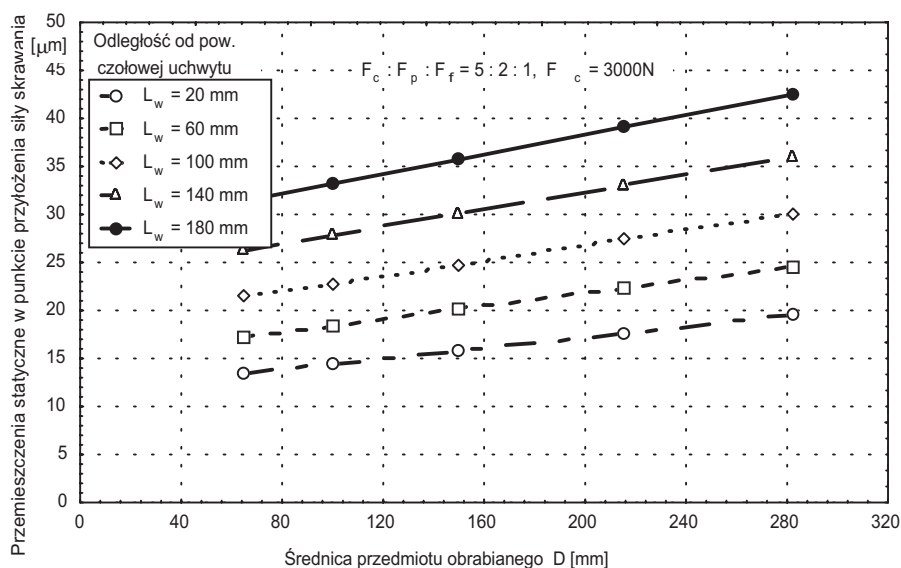
Położenie siły skrawania w czynnej przestrzeni roboczej zmienia się stosownie do realizowanych zadań technologicznych. Bezpośredni i największy wpływ na przemieszczenia zespołów tokarki, zachodzące w kierunku promieniowym, ma składowa odporowa F_p siły skrawania (rys. 6.4), gdyż działa ona na kierunku „wrażliwym”. Wpływ składowej posuwowej F_f siły skrawania, na przemieszczenia w kierunku x (rys. 6.4), jest silnie uzależniony od średnicy toczenia D . Moment gnący pochodzący od tej siły jest wprost proporcjonalny do promienia toczenia, ale jego działanie na względne przemieszczenia promieniowe nasila odległość od przedniej końcówki wrzeciona. Składowa główna F_c siły skrawania wpływa słabo w bezpośredni sposób na dokładność obróbki, ale pośrednio, poprzez moment skrawania M_c , silnie oddziałuje na siłę od napędu F_N . Siła F_N nasila lub kompensuje przemieszczenia w kierunku promieniowym zależnie od położenia koła napędzającego wrzeciono i kierunku obrotów [72], a tym samym oddziałuje na dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotu obrabianego.

W rzeczywistych warunkach roboczych składowe siły skrawania nigdy nie działają na układ pojedynczo. W zależności od geometrii narzędzia, parametrów skrawania i rodzaju obrabianego materiału zmieniają się ich wartości i wzajemne stosunki. Na rysunku 6.5 pokazano zależność przemieszczeń statycznych przedmiotu obrabianego od położenia punktu przyłożenia siły skrawania w przestrzeni roboczej tokarki, wyznaczoną obliczeniowo z uwzględnieniem sił pochodzących od napędu. W analizowanym przypadku wzrost zarówno średnicy przedmiotu obrabianego D , jak i odległości od powierzchni czołowej uchwyty L_w powoduje wzrost przemieszczeń statycznych. Przemieszczenia te pogarszają dokładność obróbki, ale tylko przy zwiększającej się odległości punktu przyłożenia siły skrawania od powierzchni czołowej szczęk uchwyty. Biorąc



Rys. 6.4. Schemat zespołu wrzecionowego tokarki z obciążeniami pochodzącymi od siły skrawania i napędu

Fig. 6.4. Scheme of the lathe spindle system with the loads from cutting and those generated by the drive

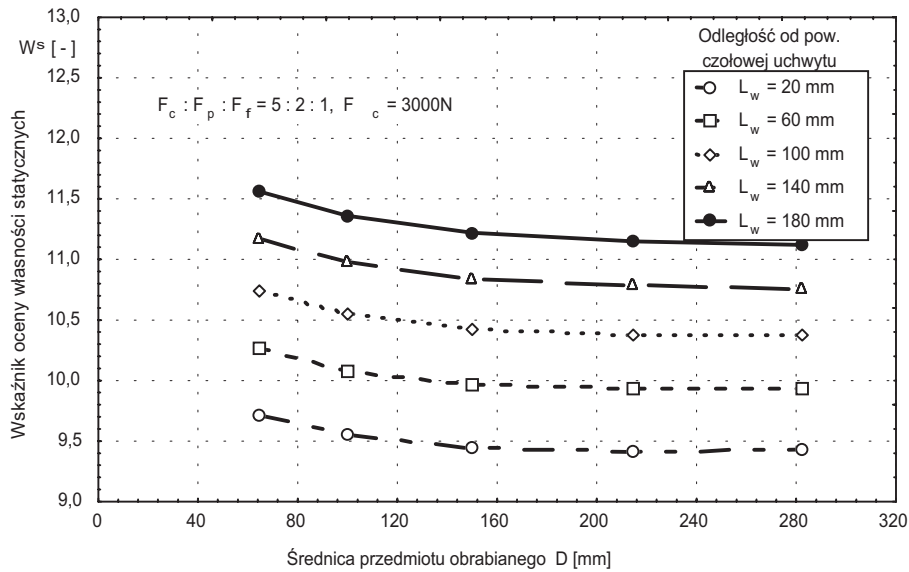


Rys. 6.5. Zależność przemieszczeń statycznych przedmiotu obrabianego od położenia punktu przyłożenia siły skrawania w polu obróbki tokarki

Fig. 6.5. Dependence of the workpiece static displacements on a position of the force application point in the lathe's working space

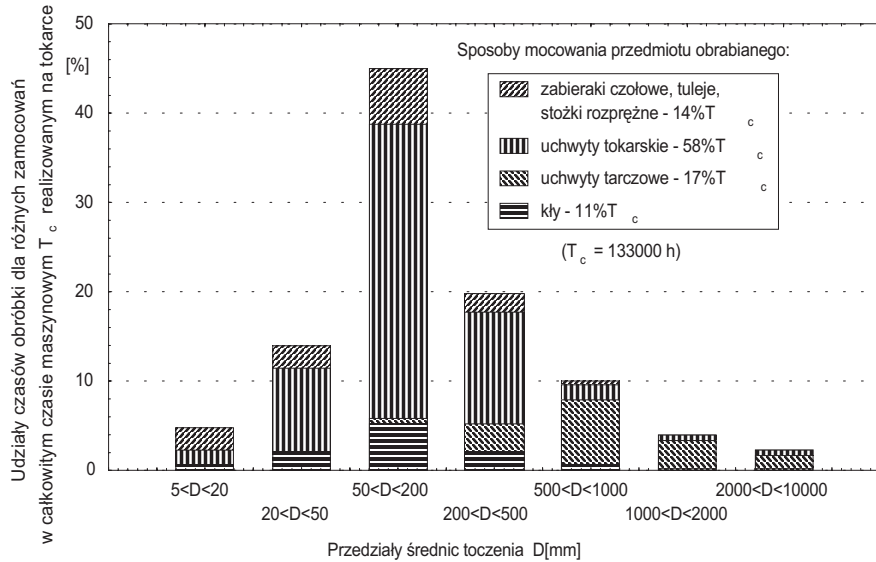
pod uwagę wprowadzony wskaźnik oceny W i traktując wyznaczone przemieszczenia jako połowę odchyłek wymiaru Δd^s spowodowanych odkształceniami statycznymi układu (por. rozdz. 5.2), można zauważyć zmniejszanie się wartości tego wskaźnika wraz ze zwiększeniem się średnicy toczenia D , wskazujące na polepszanie się klasy dokładności ISO (rys. 6.6). Wynika to z tego, że przemieszczenia układu przedmiotowego w punkcie przyłożenia siły skrawania mają różny wpływ na klasę dokładności ISO w zależności od wartości nominalnej wymiaru, którym w przypadku toczenia wzdłużnego jest średnica toczenia.

Duży wpływ na obciążenie zespołu wrzecionowego siłą skrawania ma sposób mocowania przedmiotu obrabianego. Wiele prac [38, 116, 148] podaje, że co najmniej 80% przedmiotów obrabianych na tokarkach mocowanych jest w różnego rodzaju uchwytach, głównie samocentrujących. Prezentowane w pracy [104] obszerne badania wskazują, że udział czasu obróbki przedmiotów obrabianych w uchwytach sięga 75% łącznego czasu maszynowego T_c realizowanego na tokarkach dla wszystkich rodzajów zamocowania (rys. 6.7). W wypadku zamocowania przedmiotu w uchwycie siła skrawania działa na przednią końcówkę wrzeciona na wysięgu zwiększonym o wymiar osiowy zastosowanego uchwytu. Ze zwiększeniem wysięgu wzrasta udział podatności odcinka międzypodporowego w całkowitej podatności układu wrzecionowego [65], w związku z czym rośnie też rola własności statycznych samego wrzeciona. Kąt obrotu przekroju przedniej końcówki wrzeciona, spowodowany ugięciem tego wrzeciona, silnie wpły-



Rys. 6.6. Zależność lokalnego wskaźnika oceny własności statycznych W^s od miejsca przyłożenia wypadkowej siły skrawania w polu obróbki tokarki

Fig. 6.6. Dependence of the local index of the static properties evaluation W^s on the position of the resultant force application point in the lathe's working space



Rys. 6.7. Udziały różnych sposobów mocowania przedmiotu obrabianego dla różnych zakresów średnic toczenia (dane z 19 zakładów przemysłowych [104])

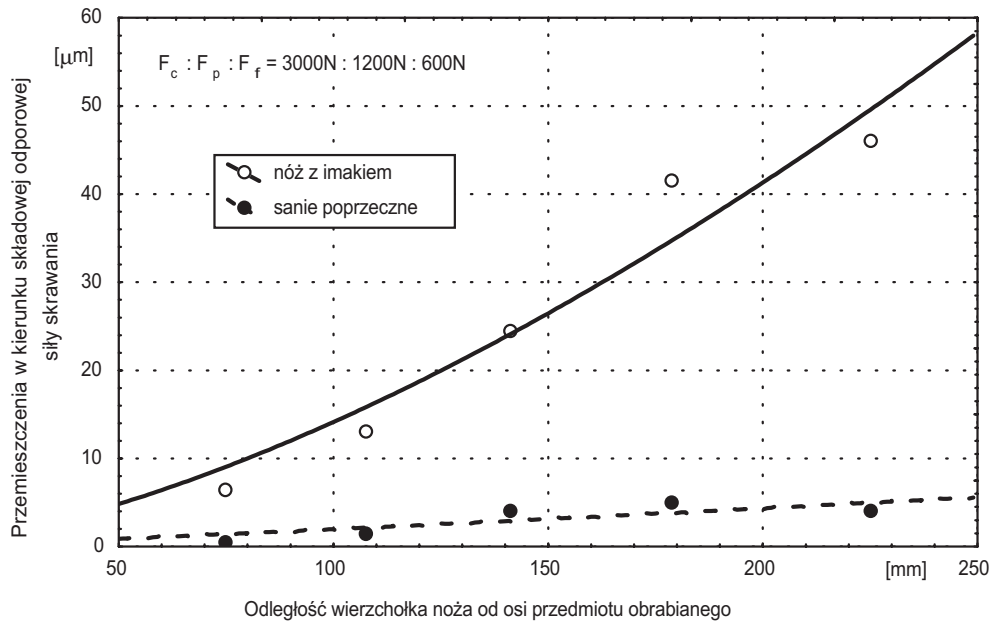
Fig. 6.7. Contribution of the different workpiece clamping types at various ranges of turning diameters (data from 19 factories [104])

wa na dokładność obróbki. Wpływ ten zwiększa się wraz z długością przedmiotu obrabianego. W przypadku własności dynamicznych duża masa uchwytu zmniejsza częstotliwości drgań własnych układu wrzecionowego i tym samym zwiększa amplitudy drgań względnych między narzędziem a przedmiotem obrabianym, zachodzących w kierunku osi x (rys. 6.4), pogarszając dokładność obróbki.

Za przyjęciem mocowania przedmiotu w uchwycie jako reprezentatywnego dla grupy tokarek uniwersalnych przemawia nie tylko fakt, że jest to najczęściej stosowany sposób mocowania, lecz także to, że jest to najniekorzystniejszy sposób obciążenia układu wrzecionowego. Mocowanie przedmiotu w kłach lub zastosowanie podtrzymek zmniejsza bezpośrednie obciążenia układu wrzecionowego, gdyż reakcje podporowe przenoszą dodatkowo inne (niż podpory łożyskowe) elementy układu konstrukcyjnego tokarki (konik, podtrzymka). W przypadku długich przedmiotów ($L/D > 3$), których nie można obrabiać w uchwytach, duża ich podatność ogranicza możliwości pełnego wykorzystania mocy napędu obrabiarki, a to ze względu na dotrzymanie określonej dokładności obróbki [65].

Odkształcenia i drgania układu narzędziowego stanowią drugie źródło niedokładności wymiarowo-kształtowej przedmiotów obrobionych. Jest on poddany z jednej strony działaniu składowych siły skrawania, a z drugiej oddziaływaniom sił od układu posuwowego. Ze względu na masywną budowę sam układ narzędziowy odkształca się sprężysto w dużo mniejszym stopniu niż układ wrzecionowy, a jego słabymi ogniwami mogą być: trzonek noża (mały przekrój poprzeczny), śruba pociągowa suportu poprzecznego lub łańcuch kinematyczny suportu wzdłużnego. Własności sprężyste układu narzędziowego zmieniają się w niewielkim stopniu dla różnych położeń suportów, ale czasem zbyt duża podatność płyty suportu poprzecznego zmienia te własności w kierunku działania siły skrawania F_c i siły odporowej F_p . Przykładowe zachowania tego układu pod wpływem działania siły całkowitej F o stałej wartości w zależności od odległości narzędzia od osi wrzeciona, będące ilustracją badań eksperymentalnych [66], przedstawia rysunek 6.8. Promieniowe przemieszczenia noża z imakiem w małym stopniu wynikały z przemieszczeń suportu poprzecznego tokarki, spowodowanych odkształceniami śruby pociągowej. Pochodziły one w głównej mierze z odkształceń płyty suportu poprzecznego związanych ze zmieniającymi się warunkami obciążenia tego zespołu (zmiana położenia punktu podparcia śruby pociągowej) i rozkładem nacisków w połączeniu prowadnicowym.

Układ narzędziowy może korzystnie oddziaływać na własności dynamiczne tokarki, gdyż duża liczba jego stałych i ruchowych połączeń jest źródłem tłumienia konstrukcyjnego, ograniczającego poziom drgań obrabiarki. Z drugiej zaś strony jego własności sprężyste wpływają bezpośrednio na częstotliwości drgań własnych obrabiarki i nadmierna jego podatność może być przyczyną gorszej wibrostanowienia. Za pośrednictwem zespołu narzędziowego „kopiowane” są na przedmiocie obrabianym błędy prostoliniowości prowadnic. Zespół ten jest poddany oddziaływaniom termicznym w dużo mniejszym stopniu niż układ wrzecionowy. Głównym źródłem ciepła w obrabiarce jest proces skrawania, ale przez narzędzie przenosi się tylko około 5% tego cie-



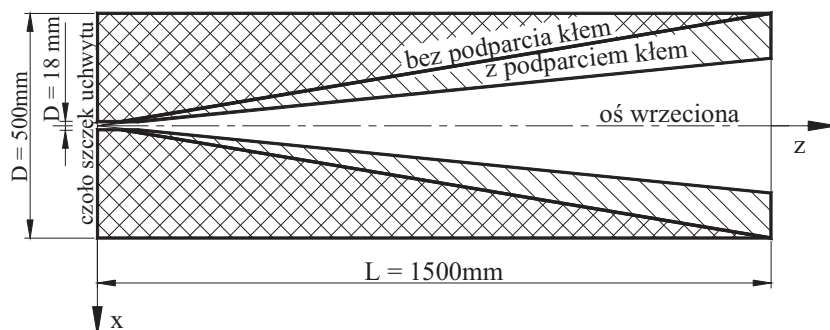
Rys. 6.8. Promieniowe przemieszczenia noża i suportu poprzecznego tokarki pod wpływem działania stałej siły całkowitej F w zależności od odległości narzędzia od osi wrzeciona [66]

Fig. 6.8. Radial displacements of the lathe tool and cross slide upon the constant total force F exerted by a cutting part depending on the distance of the tool from the spindle axis [66]

pła i udział ten maleje wraz ze wzrostem stosowanych prędkości skrawania. Wymiary układu narzędziowego ograniczają też średnicę toczenia przedmiotów nad suportem poprzecznym.

Ogólnie przestrzeń robocza obrabiarki jest definiowana jako przestrzeń zajmowana przez przedmiot obrabiany, narzędzia i uchwyty podczas realizacji ruchów niezbędnych do wykonania operacji obróbkowych [163]. Pole przedmiotu obrabianego [163] rozważanej tokarki TUR 50 stanowi obszar o wymiarach odpowiadających średnicy toczenia nad łóżem $\phi 500$ mm i rozstawowi kłów 1500 mm. W przypadku zastosowania uchwyty samocentrującego przestrzeń ta zmniejsza się o pole uchwyty [163], a pozostała jego część tworzy czynną przestrzeń roboczą, czyli tą, w której możliwa jest obróbka. Wspólny obszar tej przestrzeni oraz pola roboczego narzędzia, w którym skrawająca część narzędzia może się stykać z przedmiotem obrabianym stanowi pole obróbki [163] (rys. 6.9). W przypadku tokarek ma ono kształt prostokąta.

W celu dokonania analizy występujących obciążeń pole obróbki podzielono wstępnie na pola elementarne, dla których, na podstawie rozmieszczenia powierzchni obrabianych zbioru przedmiotów dostępnych w bazie danych [65, 69, 131], określano częstość wystąpienia siły skrawania, uwzględniając liczebność przedmiotów w serii produkcyjnej. Przyjęto wstępnie podział równomierny, co 25 mm, w kierunku osiowym i promieniowym (w odniesieniu do średnic). Wstępny podział przestrzeni roboczej był

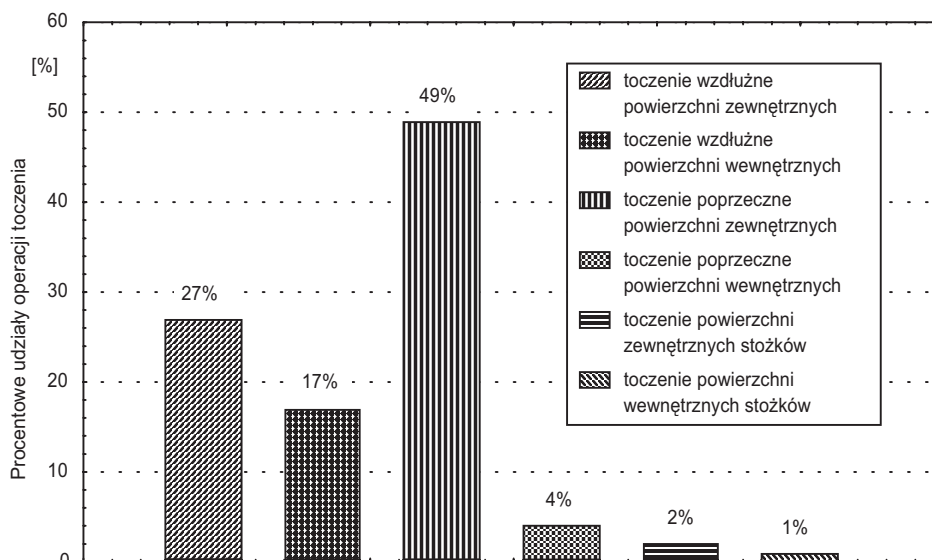


Rys. 6.9. Pełne pole obróbki tokarki TUR50 dla przedmiotów mocowanych w uchwycie podczas toczenia bez podparcia i z podparciem w kłom konika

Fig. 6.9. Full working space of the TUR50 lathe for workpieces fixed in the chuck during turning without and with support at the tail centre

stosunkowo gęsty, aby zlokalizować i zawęzić badania do obszarów, w których występuje najczęściej obróbka przedmiotów. Dolny zakres średnic ograniczono do 18 mm ze względu na to, że analizowana tokarka była średniej wielkości. Dodatkowe ograniczenie średnic w tym zakresie wynikało z zastosowania uchwytu trójszczękowego, w którym dopuszcza się obróbkę bez podparcia kłem, jeśli spełniony jest warunek $L/D \leq 3$ (stosunek długości do średnicy przedmiotu), a z podparciem kłem, gdy $3 < L/D \leq 5$ [65]. Z tego względu, dla większych długości przedmiotów była możliwa ich obróbka w uchwycie, ale dla większych średnic niż przyjęta dolna granica 18 mm.

Kolejnego rozstrzygnięcia wymagał dobór reprezentatywnych odmian obróbki. W pracy [136] stwierdzono, że wśród wielu operacji toczenia za reprezentatywne należy uznać toczenie wzdłużne i poprzeczne. Stwierdzenie to zweryfikowano, analizując powierzchnie obrabiane 1962 przedmiotów umieszczonych w bazie danych przedmiotów walcowych [66]. Dokonano selekcji i ustalono udziały podstawowych odmian toczenia w każdym zamocowaniu, przy założeniu, że przedmioty te mocowane są w uchwytach samocentrujących, a ich gabaryty umożliwiają obróbkę w czynnej przestrzeni roboczej badanej tokarki (rys. 6.10). Wśród danych obejmujących przedmioty obrabiane stwierdzono dominujący udział liczby operacji toczenia poprzecznego powierzchni zewnętrznych. Pośród tych operacji stosunkowo niewiele było zabiegów planowania powierzchni czołowej przedmiotu obrabianego, a więc skrawania poprzecznego na dłuższym odcinku. Większość z nich stanowiły zabiegi wykonywania różnego rodzaju podcięć, gdzie skrawanie poprzeczne odbywa się na krótkich odcinkach. Zabiegi toczenia wzdłużnego, dla ujętych w bazie danych przedmiotów obrabianych, stanowiły łącznie 44% wszystkich operacji toczenia. Łączna długość przemieszczeń wzdłużnych narzędzia, potrzebnych do zrealizowania obróbki wszystkich tych przedmiotów,



Rys. 6.10. Udziały podstawowych odmian toczenia, w odniesieniu do wszystkich zabiegów, jakie mogłyby wystąpić podczas obróbki wszystkich przedmiotów ujętych w analizowanej bazie danych
 Fig. 6.10. Percentage fractions of the basic turning types related to all operations that could occur during machining of all workpieces included in the analyzed database

byłaby prawdopodobnie znacznie większa niż łączna długość przemieszczeń poprzecznych. Pośrednio wynika to z faktu, że dla tokarek łączny czas maszynowy związany z toczeniem wzdłużnym przedmiotów jest dominujący. Biorąc również pod uwagę, że dla toczenia kierunku normalnego do powierzchni walcowej przedmiotu obrabianego jest najbardziej „wrażliwym” (najbardziej wpływającym na dokładność obróbki) [156], a powierzchnia ta kształtowana jest podczas zabiegów toczenia wzdłużnego, przyjęto ten rodzaj operacji za reprezentatywny dla tokarek.

Jako reprezentatywne narzędzie, stosowane w obróbce wykańczającej powierzchni walcowych przedmiotów wykonanych ze stali, przyjęto nóż tokarski o kącie przystawienia $\kappa = 45^\circ$ [65]. Wybór tego noża podyktowany był faktem, że podczas skrawania takim nożem występuje stosunkowo duża siła odporowa F_p , która bezpośrednio wpływa na efekty obróbki w kierunku przyjętym za „wrażliwy”. Skrawanie tego typu nożem odbywa się w warunkach mniej korzystnych, z punktu widzenia uzyskiwanej dokładności, niż w wypadku noża o kącie przystawienia $\kappa = 90^\circ$. Do toczenia wzdłużnego zastosowano więc, jako reprezentatywny, nóż składany z wymienną płytką z węglików spiekanych S20 (SPUN 120308) o następującej geometrii ostrza: kąt przystawienia $\kappa = 45^\circ$, kąt natarcia $\gamma = -7^\circ$, oraz kąt przyłożenia $\alpha = 11^\circ$. Promień zaokrąglenia wierzchołka noża r_ϵ wynosił 0,8 mm.

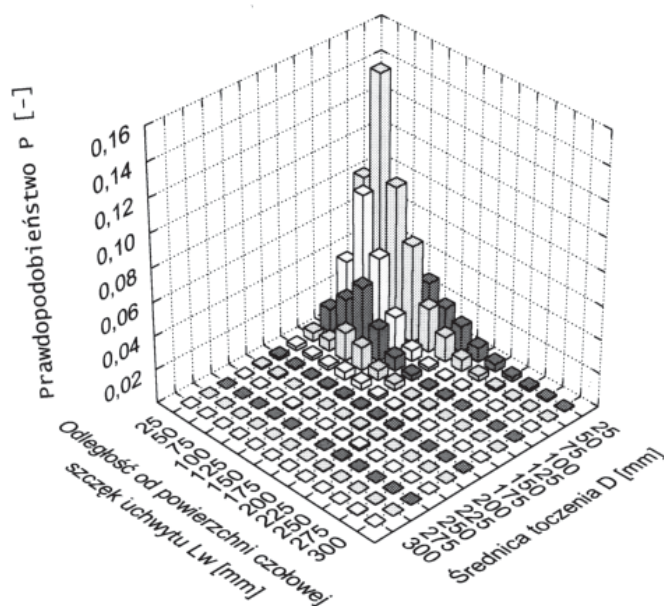
6.4. USTALENIE ZBIORU REPREZENTATYWNYCH STANÓW OBCIĄŻENIA STRUKTURY UKŁADU KONSTRUKCYJNEGO

Rzeczywisty rozkład stanów obciążeń, występujących w czasie eksploatacji w przestrzeni roboczej tokarki, określić można na podstawie znajomości stawianych jej zadań obróbkowych. Przydatna do tego może być analiza współrzędnych powierzchni obrabianych dla dużej populacji przedmiotów, z uwzględnieniem warunków ich mocowania. Jak podano w rozdziale 6.3, 80% wszystkich toczonych przedmiotów [38] obrabia się w uchwytach. Ze zbioru zgromadzonych danych [66, 70] wybrano więc tylko przedmioty mocowane w uchwycie. Dokonano transformacji współrzędnych, opisujących obrabiane powierzchnie, z układu przedmiotowego do układu mocowania [131], którego bazę stanowiła powierzchnia czołowa szczęk uchwytu. Uwzględniono przy tym długość szczęk uchwytu oraz długości mocowania poszczególnych przedmiotów. Dla każdego z wyselekcjonowanych przedmiotów przeprowadzono dyskretyzację, opisanych w karcie technologicznej, torów ruchu wierzchołka noża, wynikających z realizacji obróbki poszczególnych powierzchni. Otrzymano w ten sposób zbiór par współrzędnych: odległość od powierzchni czołowej uchwytu z_i i promień toczenia x_i . Na podstawie tego zbioru wyznaczono rozkład częstości występowania obciążeń w polu obróbki analizowanej tokarki [65, 69, 131].

Najpierw przeprowadzono analizę statystyczną dla wstępnie przyjętego, równomiernego podziału pola obróbki. Stwierdzono, że uzyskany rozkład prawdopodobieństwa, określający częstość występowania skrawania w określonych obszarach tego pola (rys. 6.11) jest niesymetryczny, a zdecydowana większość przypadków toczenia występuje w zakresie średnic poniżej 200 mm i przy długościach toczenia poniżej 200 mm. Rozkład o podobnym, niesymetrycznym charakterze, wynikający z przeanalizowania bardzo dużej liczby powierzchni przedmiotów obrabianych na tokarkach w różnych zakładach przemysłu maszynowego, opublikowano w pracy [104].

Ze względu na większą gęstość rozkładu częstości w zakresie przedmiotów o małych gabarytach, ograniczono analizowany fragment pola obróbki do rozmiarów $\phi 180 \times 200$ mm i ponownie dokonano jego podziału. W kierunku osiowym przyjęto podział równomierny co 40 mm, natomiast w kierunku promieniowym odpowiadał on zakresom wymiarów nominalnych (rys. 6.12). Podyktowane to było tym, że w tych zakresach średnic określonym klasom dokładności odpowiadają takie same wartości odchyłek dopuszczalnych. Dla tak przyjętego podziału i założonego pola obróbki dokonano selekcji przedmiotów, spełniających warunki co do gabarytów i mocowania w uchwycie trójszczekowym, a następnie wyznaczono prawdopodobieństwa zdarzeń, związane z wystąpieniem skrawania w założonych polach elementarnych.

Wstępnie rozważono dwa warianty rozmiarów pola obróbki, różniące się minimalną średnicą toczenia. W pierwszym z nich średnica ta wynosiła 18 mm ($\phi 18 \text{ mm} \leq D \leq \phi 180 \text{ mm}$, $0 \leq L \leq 200 \text{ mm}$), a w drugim – 50 mm ($\phi 50 \text{ mm} \leq D \leq \phi 180 \text{ mm}$, $0 \leq L \leq$

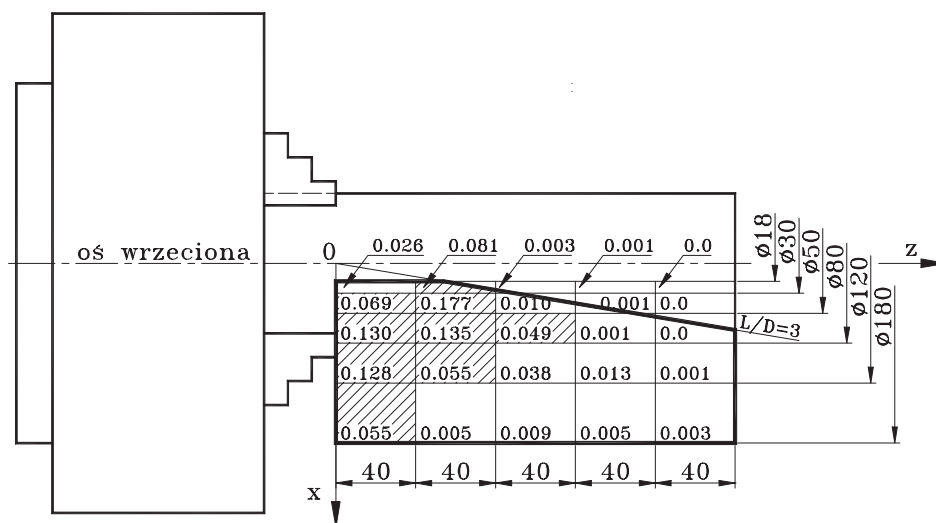


Rys. 6.11. Rozkład prawdopodobieństwa występowania operacji skrawania w różnych obszarach pola obróbki

Fig. 6.11. Probability distribution of the occurrence of cutting operations in the various areas of the lathe working space

200 mm). W wyniku przeprowadzonej selekcji dla pierwszego wariantu wybrano 1334 przedmioty obrabiane spełniające kryteria mocowania i gabarytowe, a dla drugiego, odpowiednio 1022 przedmioty. W obu wypadkach do dalszej analizy wybrano tylko te pola, w których prawdopodobieństwa wystąpienia skrawania były większe od 0,05 (por. zakreskowane pola na rys. 6.12). W polach tych znalazło się w pierwszym wariantcie łącznie 88%, spośród wyselekcjonowanych przedmiotów obrabianych, a w drugim – 94%. Dalszą analizę ograniczono do stanów struktury nośnej tokarki, odpowiadających położeniom siły całkowitej F (wywieranej przez ostrze noża na zespół przedmiotowy i narzędziowy) w środkach tych pól elementarnych. Prawdopodobieństwa występowania siły skrawania w wybranych polach elementarnych poddano normalizacji, dzieląc liczbę zdarzeń w każdym polu przez sumę zdarzeń we wszystkich wybranych (według podanej zasady) polach (rys. 6.13). Tak utworzone liczby stanowią współczynniki wag, związane z występowaniem obciążenia w określonych polach elementarnych pola obróbki tokarki, które są stosowane następnie w procedurze oceny.

Porównując oba rozkłady współczynników wag (rys. 6.13) stwierdzić można, że są różne, zależnie od rozmiarów założonego pola obróbki. W pierwszym przypadku (rys. 6.13a), w zakresie średnic od 30 do 50 mm znajduje się aż 312 przedmiotów. Pominięcie tego zakresu średnic (dla takich samych pozostałych warunków selekcji) w drugim przypadku (rys. 6.13b) prowadzi do zwiększenia współczynników wag w obrębie po-

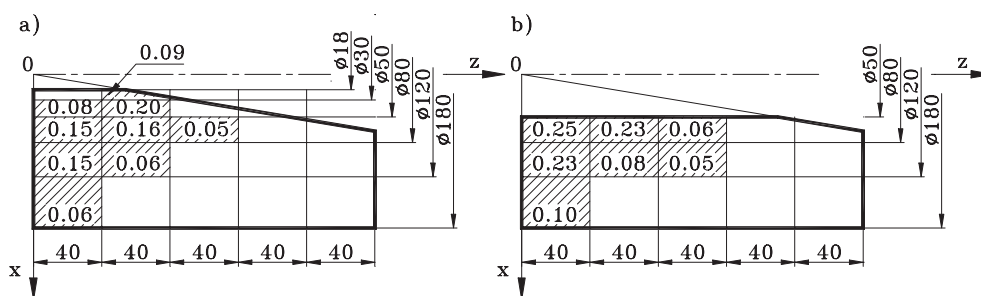


Rys. 6.12. Wariant podziału pola obróbki tokarki na pola elementarne oraz prawdopodobieństwa wystąpienia w tych polach sił skrawania

Fig. 6.12. Variant of the lathe working space division into elementary areas and the probability of the occurring of cutting forces in these areas

równywalnych pól elementarnych. Przyjęcie odpowiednich, do wielkości danej obrabiarki, rozmiarów czynnej przestrzeni roboczej ma zatem duży wpływ na wskaźniki wyznaczone w toku oceny.

W odniesieniu do tokarki średniej wielkości, jaką jest TUR50, do procedury oceny przyjęto drugi wariant podziału pola obróbki ($\phi 50 \text{ mm} \leq D \leq \phi 180 \text{ mm}$, $0 \leq L \leq 200 \text{ mm}$) i odpowiadające mu współczynniki wag. Wynikało to z faktu, że przy mniejszych średnicach przedmiotu obrabianego zwiększa się wpływ jego podatności na uzyskiwaną



Rys. 6.13. Znormalizowane współczynniki wag w reprezentatywnych polach elementarnych wyznaczone dla różnych rozmiarów pola obróbki dla $D_{\min} = 18 \text{ mm}$ (a), $D_{\min} = 50 \text{ mm}$ (b)

Fig. 6.13. Standardized weight factors in the representative elementary areas determined for various working space sizes when: $D_{\min} = 18 \text{ mm}$ (a), $D_{\min} = 50 \text{ mm}$ (b)

dokładność wymiarowo kształtową. Wpływ ten narasta ze zwiększaniem się wysięgu przedmiotu. Ponadto, dla pierwszego wariantu podziału pola obróbki, w jednym z wybranych pól elementarnych ($\phi 18 \text{ mm} \leq D \leq \phi 30 \text{ mm}$, $40 \leq L \leq 80 \text{ mm}$), zachodziłaby konieczność realizacji toczenia z podparciem kłem konika, ze względu na niekorzystny stosunek $L/D > 3$, a więc warunki mocowania przedmiotu odbiegałyby od pozostałych.

Ocena tokarki TUR50 dokonywana zatem była przy siedmiu reprezentatywnych stacjach konfiguracji i obciążenia struktury układu konstrukcyjnego, które odpowiadały wzajemnym położeniom zespołów podczas skrawania w obrębie każdego z wybranych pól elementarnych, zgodnie z drugim wariantem podziału pola obróbki (rys. 6.13b).

Przydatność metody wyznaczania rozkładu obciążeń w polu obróbki tokarki została w praktyce zweryfikowana i oprogramowana. Włączono ją, w opracowanym eksperymencie komputerowo wspartego konstruowania, do procedur oceny własności statycznych układów wrzecionowych obrabiarek [49].

6.5. ANALIZA I PRZYJĘCIE PARAMETRÓW SKRAWANIA DLA REPREZENTATYWNYCH NARZĘDZI

Według polskiej normy [201] (równoważnej normie ISO [179]), badania pracą powinny być przeprowadzane na tokarkach podczas obróbki wykańczającej, a przedmioty obrabiane powinny być wykonane z łatwo skrawalnej stali lub żeliwa. Próbkę wykonano z wcześniej przyjętego materiału, dobrze skrawalnej stali 45, który dostarczony był w postaci pręta walcowanego. Ich gabaryty dostosowano do możliwości skrawania w środku reprezentatywnych pól elementarnych przy zamocowaniu w typowym uchwycie trójszczękowym typu PUTm $\phi M250ZJ$ (długość szczęk – 45mm), będącym na wyposażeniu tokarki. Zestawienie wymiarów próbek użytych do badań skrawaniowych i oceny tokarki ujęto w tabeli 6.1.

Wymiary powierzchni walcowych próbek, zastosowany materiał i przyjęte reprezentatywne narzędzie (por. rozdz. 6.3) były podstawą doboru podstawowych parametrów skrawania odpowiadających obróbce wykańczającej. Podczas toczenia dokładnego usuwane są niewielkie warstwy materiału w celu nadania przedmiotowi dokładnych wymiarów i kształtu, siły skrawania mają więc małe wartości, z uwagi na małe przekroje warstwy skrawanej. Głębokość skrawania dobrano w zakresie naddatków pozostawianych na toczenie dokładne [113]. W pracy przyjęto $a_p = 0,5 \text{ mm}$. W zależności od dopuszczalnej, dla obróbki wykańczającej, chropowatości powierzchni obrobionej od 1,6 do 4 μm , posuw f powinien mieścić się w zakresie od 0,08 do 0,17 mm/obr (dla promieni zaokrąglenia wierzchołka ostrza 0,4–1,2 mm) [112], przyjęto więc $f = 0,08 \text{ mm/obr}$. Zastosowano normatywne prędkości skrawania, które dla obróbki dokładnej nożem tokarskim z płytką z węglików spiekanych S20 mieszczą się w zakresie od 120 do 200 m/min [112]. W przypadku prób skrawaniowych rzeczywiste prędkości skrawania nie przekraczały 200 m/min. Zastosowane w badaniach parametry skrawania zgru-

Tabela 6.1. Wymiary próbek użytych do badań skrawaniowych i oceny tokarki TUR50 w zależności od położenia przyjętego pola elementarnego w przestrzeni roboczej

Table 6.1. Sizes of test pieces used for cutting tests and for evaluation of the TUR50 lathe due to the assumed position of the elementary area in the working space

Zakres średnic toczenia	Zakres odległości od powierzchni czołowej szczęk uchwytu		
	0 ÷ 40 mm	40 ÷ 80 mm	80 ÷ 120 mm
Ø50 ÷ Ø80 mm	Próbka A Ø80 mm × 85 mm	Próbka D Ø80 mm × 125 mm	Próbka F Ø80 mm × 165 mm
Ø80 ÷ Ø120 mm	Próbka B Ø120 mm × 85 mm	Próbka E Ø120 mm × 125 mm	Próbka G Ø120 mm × 165 mm
Ø120 ÷ Ø180 mm	Próbka C Ø160 mm × 85 mm	—	—

powano w tabeli 6.2. Maksymalne prędkości skrawania v_c podane w tej tabeli wyznaczone zostały dla nominalnych średnic próbek i dla nominalnych prędkości obrotowych wrzeciona. W praktyce prędkości obrotowe wrzeciona są nieco mniejsze od nominalnych, a skrawany jest materiał próbki o średnicy mniejszej niż początkowa (nominalna). Podane w tej tabeli głębokości skrawania odnoszą się do powierzchni obrobionych przedmiotów, na których oceniano błędy kształtu i chropowatość. W odniesieniu do

Tabela 6.2. Nominalne parametry skrawania zastosowane do badań i oceny tokarki TUR50

Table 6.2. Nominal cutting parameters used for test and evaluation of the TUR50 lathe

Zakres średnic toczenia	Zakres odległości od powierzchni czołowej szczęk uchwytu		
	0 ÷ 40 mm	40 ÷ 80 mm	80 ÷ 120 mm
Ø50 ÷ Ø80 mm	Próbka A (Ø70) $n = 900 \text{ obr/min} \Rightarrow$ $(v_c = 198 \text{ m/min})$ $f = 0,08 \text{ mm/obr}$ $a_p = 0,5 \text{ mm}$	Próbka D (Ø70) $n = 900 \text{ obr/min} \Rightarrow$ $(v_c = 198 \text{ m/min})$ $f = 0,08 \text{ mm/obr}$ $a_p = 0,5 \text{ mm}$	Próbka F (Ø70) $n = 900 \text{ obr/min} \Rightarrow$ $(v_c = 198 \text{ m/min})$ $f = 0,08 \text{ mm/obr}$ $a_p = 0,5 \text{ mm}$
Ø80 ÷ Ø120 mm	Próbka B (Ø109) $n = 560 \text{ obr/min} \Rightarrow$ $(v_c = 192 \text{ m/min})$ $f = 0,08 \text{ mm/obr}$ $a_p = 0,5 \text{ mm}$	Próbka E (Ø109) $n = 560 \text{ obr/min} \Rightarrow$ $(v_c = 192 \text{ m/min})$ $f = 0,08 \text{ mm/obr}$ $a_p = 0,5 \text{ mm}$	Próbka G (Ø109) $n = 560 \text{ obr/min} \Rightarrow$ $(v_c = 192 \text{ m/min})$ $f = 0,08 \text{ mm/obr}$ $a_p = 0,5 \text{ mm}$
Ø120 ÷ Ø180 mm	Próbka C (Ø154) $n = 450 \text{ obr/min} \Rightarrow$ $(v_c = 218 \text{ m/min})$ $f = 0,08 \text{ mm/obr}$ $a_p = 0,5 \text{ mm}$	—	—

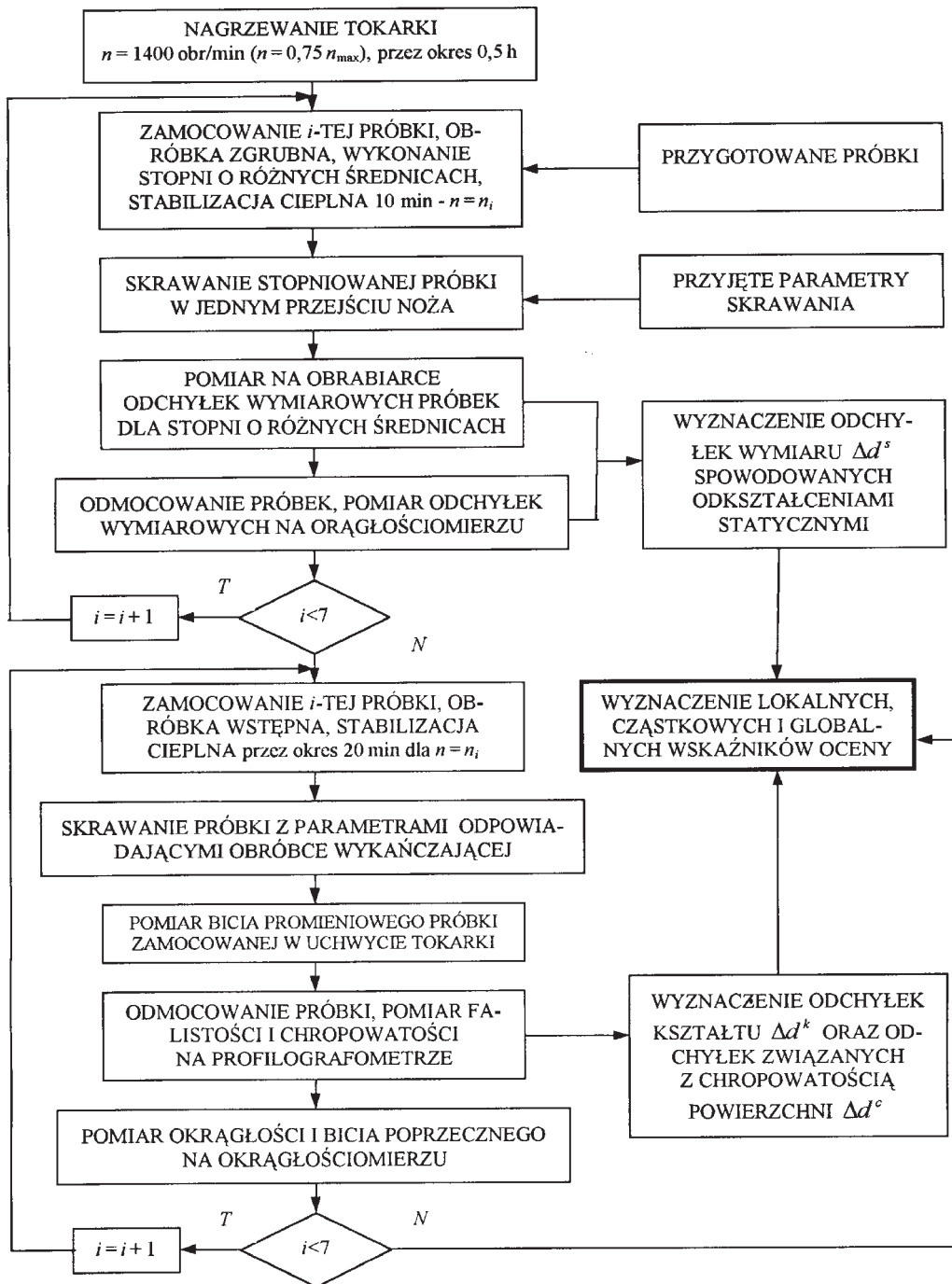
oceny własności statycznych tokarek stosowano toczenie próbek stopniowanych, o skokowo zmieniającej się głębokości skrawania w zakresie od 0,05 do 3 mm. Toczenie z najmniejszym naddatkiem wykonywano w odniesieniu do powierzchni, która służyła jako baza pomiarowa przy ocenie tych własności.

Nowoczesne konstrukcje obrabiarek i materiały płytek stosowanych w nożach tokarskich umożliwiają realizację większych, niż przyjęto w tej pracy, prędkości skrawania. Przykładowo, w poradniku doboru narzędzi firmy SANDVIK [24] dla obróbki wykańczającej stali zaleca się stosowanie średniej prędkości skrawania około 350 m/min. Zdecydowano się jednak zastosować płytkę z węglików spiekanych S20 i przyjąć wartość tego parametru około 200 m/min (zgodnie z zaleceniami poradnika [112]), gdyż konstrukcja dostępnej i użytej, do testowania metody oceny, tokarki nie jest najnowocześniejsza i przez to dostosowana do dużych prędkości skrawania.

6.6. PROGRAM BADAŃ, MIERZONE PARAMETRY I METODA ANALIZY WYNIKÓW

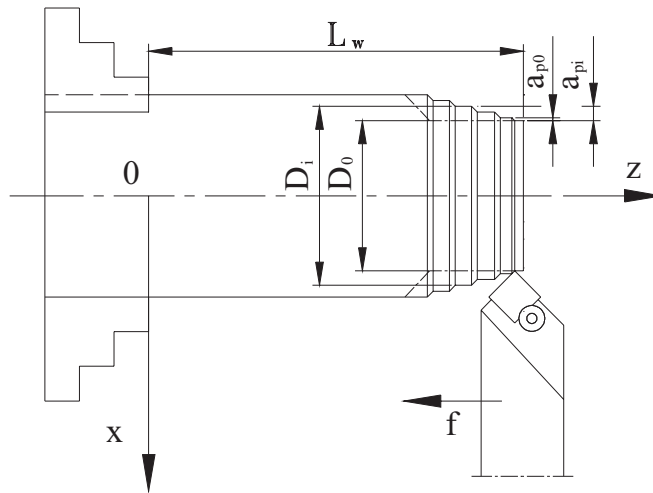
Program badań obejmował przeprowadzenie prób toczenia wzdłużnego próbek walcowych (tabela 6.1), które umożliwiły realizację procesu obróbki w siedmiu, przyjętych jako elementarne, polach obróbki tokarki (rys. 6.13b). Do skrawania stosowano nóż składany z płytką z węglików spiekanych S20 o kącie przystawienia $\kappa = 45^\circ$ i parametry obróbki podane w tabeli 6.2. Wszystkie próby skrawaniowe przeprowadzono w stanie termicznie ustalonej obrabiarki, po półgodzinnej pracy na biegu jałowym, z nominalną prędkością obrotową wrzeciona zgodną z wartością podaną dla każdej próbki w tabeli 6.2. Ze względu na przyjęte wymiary próbek ($L/D < 3$) nie było konieczne stosowanie podparcia kłem konika. Każdą próbę toczenia wykonywano z użyciem nowej krawędzi skrawającej stosowanej płytki, a więc w identycznych stanach odnoszących się do promienia zaokrąglenia wierzchołka noża i stanu stępienia krawędzi skrawającej.

Badania tokarki mające na celu wyznaczenie wskaźników oceny przeprowadzono według schematu przedstawionego na rysunku 6.14. Przed badaniami każda próbka walcowa była wstępnie zgrubnie obrabiana, w celu usunięcia niewspółosiowości związanej z zamocowaniem w uchwycie tokarskim. Następnie wykonywano kilka stopni powierzchni walcowej, które umożliwiły obróbkę tej próbki z różnymi naddatkami (rys. 6.15) [126]. Pierwszy stopień miał bardzo mały naddatek i służył do wykonania bazy do pomiaru odchyłek wymiarowych [140]. Procedura pomiaru sztywności układu obrabiarka – przedmiot obrabiany – narzędzie polegała: na obróbce stopniowanej próbki w jednym przejściu noża, czemu towarzyszyły różne wartości siły skrawania (związane ze skrawaniem różnych naddatków materiału) i na n -krotnym pomiarze odchyłek wymiarów D_i dla każdego i -tego naddatku (rys. 6.15). Odchyłki ΔD_i^s odnoszono do bazy pomiarowej, którą stanowiła powierzchnia walcowa, toczona z minimalną głębokością, $a_p = 0,05$ mm (zależność 6.1).



Rys. 6.14. Schemat przeprowadzania badań tokarki podczas wyznaczania wskaźników oceny

Fig. 6.14. The lathe testing procedure chart in the determination of evaluation indexes



Rys. 6.15. Sposób obróbki i pomiar odchyłek średnicy podczas wyznaczania charakterystyki statycznej tokarki

Fig. 6.15. Method of machining and measurement of diameter deviations during determination of the static characteristic of the lathe

$$\Delta d_i^s = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |D_i - D_0| \quad (6.1)$$

Do wyznaczania odchyłek wymiaru zastosowano dwie metody pomiarowe. W pierwszej z nich, realizowanej bezpośrednio po próbie skrawaniowej, na przedmiocie zamocowanym w uchwycie tokarki, określano różnicę między średnią wartością bicia poprzecznego przedmiotu obrabianego w analizowanym przekroju i w przekroju bazy pomiarowej. W trakcie wykonywania kilku pełnych obrotów wrzeciona, dotykowy czujnik zegarowy o działce elementarnej $1 \mu\text{m}$, zamocowany na imaku narzędziowym, mierzył względne przemieszczenia między zespołem narzędziowym a obracającą się próbką. Czujnik miał niezmiennie promieniowe położenie w stosunku do badanej próbki, w związku z czym zmiany mierzonych przemieszczeń wynikały głównie ze zmian średnicy tej próbki, jakie powstały w wyniku obróbki. W drugiej, dokładniejszej metodzie, realizowanej poza obrabiarką – na okrągłościomierzu, wyznaczano różnicę między średnimi wartościami bicia poprzecznego w odpowiednich przekrojach poprzecznych. Obie metody porównano pod kątem oceny przydatności do pomiarów prostego czujnika dotykowego, który jest zazwyczaj dostępny w zakładach obrabiarkowych, w odróżnieniu od drogiego okrągłościomierza. Zastosowanie czujnika dotykowego w tego typu pomiarach znacznie uprościłoby je.

Uzyskane wyniki umożliwiały wyznaczenie skutków odkształceń statycznych tokarki w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych (obciążenia układu konstrukcyjnego pro-

cesem skrawania), ale zasadniczo służyły do określenia odchyłki wymiaru ΔD^s , odpowiadającej głębokości toczenia, założonej dla obróbki wykańczającej. Wyznaczano ją na podstawie krzywej potęgowej (6.2), aproksymującej zależności odchyłki wymiaru ΔD^s od założonej głębokości skrawania a_p , podstawiając, dla głębokości a_{pi} , odpowiadającej i -temu naddatkowi, średnie zmierzone odchyłki ΔD_i^s . Zdecydowano się zastosować pośredni sposób wyznaczania odchyłki, aby uniknąć zbyt dużych błędów pomiarowych, gdyż ze względu na małe siły skrawania występujące podczas obróbki wykańczającej (dla $a_p = 0,5$ mm), towarzyszące im odchyłki wymiarowe miały również niewielkie wartości, często tylko w niewielkim stopniu przekraczające granicę rozdzielczości przyrządów pomiarowych. Podczas pomiarów odchyłek wymiarowych przedmiotu zamocowanego w uchwycie trójścękowym korzystano z układu kinematycznego tokarki, stosując najmniejszą prędkość obrotową wrzeciona $n = 18$ obr/min. Stąd końcówka pomiarowa czujnika przemieszczała się stale w tym samym położeniu w stosunku do bruzdy, powstałej po przejściu wierzchołka noża. Do aproksymacji krzywej potęgowej zastosowano aparat matematyczny pakietu programów STATISTCA 5.0.

$$\Delta d^s = a a_p^b \quad (6.2)$$

gdzie: a, b – współczynniki aproksymowanej krzywej potęgowej.

Obróbka takiego samego wałka stopniowanego służyła również do przeprowadzenia badań dodatkowych polegających na wyznaczeniu składowych siły skrawania. Podkreślić należy, że pomiaru tych sił nie przeprowadzono podczas obróbki próbek służących do oceny dokładności tokarki. Wynikało to z faktu, że zainstalowany trójskładowy siłomierz tokarski zmienia strukturę obrabiarki (zastępuje imak narzędziowy) i w ten sposób mógłby wpływać na odchyłki wymiarowe przedmiotu obrabianego. Składowe siły skrawania wyznaczano jako wartości skuteczne sygnałów sił, odpowiadających skrawaniu z ustalonym naddatkiem. Wyznaczone wartości siły skrawania F_c wraz z głębokościami a_p odpowiadającymi i -temu naddatkowi umożliwiały aproksymowanie zależności (6.3), która obrazuje sztywność układu obrabiarka–uchwyt–przedmiot obrabiany–narzędzie w warunkach roboczych.

$$a_p = c F_c^d \quad (6.3)$$

gdzie: c, d – współczynniki aproksymowanej krzywej potęgowej.

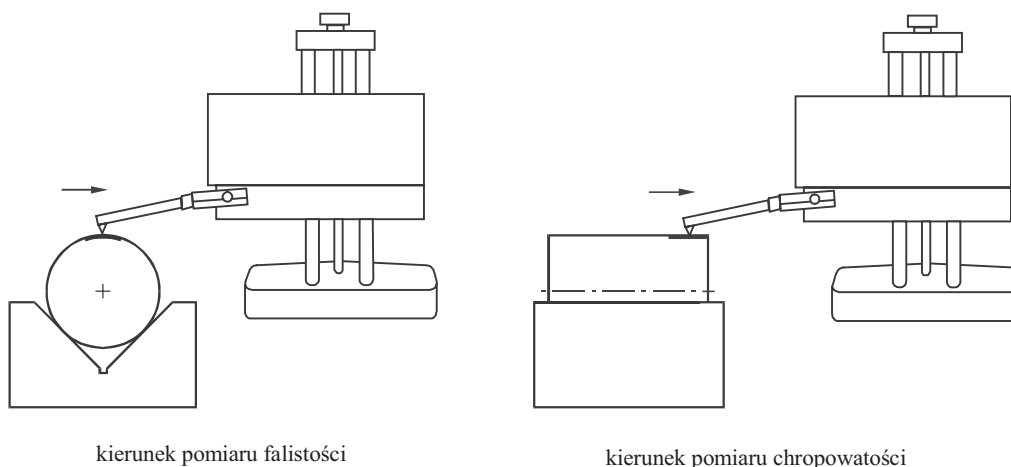
Pomiar sił skrawania służył dwóm zamysłom. Miał on dostarczyć danych dotyczących wartości poszczególnych składowych siły skrawania i wzajemnych ich stosunków, jakie występują podczas obróbki wykańczającej. Dane takie są potrzebne do wszelkiego rodzaju analiz obliczeniowych i do zapewnienia porównywalnych warunków obciążenia układu konstrukcyjnego tokarki. Drugi cel wykorzystania wyników zakładał możliwość wyznaczenia, przez ekstrapolację, głębokości skrawania a_p , jaka odpowiadałaby określonej sile skrawania F_c (pod warunkiem zachowania takiego samego posuwu i prędkości skrawania). W ten sposób można by, rozważając teoretycznie, dla siły skrawania F_{cmax} , odpowiadającej wykorzystaniu pełnej mocy lub maksymalnego mo-

mentu skrawania na wrzecionie tokarki M_c , wyznaczyć ekwiwalentną głębokość skrawania i odpowiadające jej maksymalne odchyłki wymiarowe Δd_{\max}^s (z zależności (6.2)) dla każdego z reprezentatywnych pól elementarnych. Ekwiwalentne całkowite odchyłki średnicy ΔD , odpowiadające odchyłkom Δd_{\max}^s (por. zależność (5.4)), nie powinny przekroczyć wartości dopuszczalnych odchyłek dla wymiarów nietolerowanych według [194]. Po ich wykorzystaniu do wyznaczenia odpowiednich wskaźników oceny własności statycznych (por. rozdz. 5), wartości graniczne tych wskaźników nie powinny przekroczyć liczby odpowiadającej klasie dokładności wymiarów nietolerowanych związanej z analizowaną tokarką, czyli 12. Wyznaczone w ten sposób wskaźniki globalny lub odbiorczy mogłyby być odniesione do maksymalnych, potencjalnych obciążeń statycznych tej tokarki.

Po wykonaniu pomiarów, związanych z wyznaczaniem charakterystyki statycznej obrabiarki, powierzchnia próbki była przygotowywana do dalszych badań przez ponowne toczenie wzdłużne, z małym naddatkiem, w celu usunięcia warstwy materiału o nierównej grubości, jaka pozostała z obróbki stopniowanego wałka.

Obróbkę każdej z próbek przeprowadzano z parametrami skrawania podanymi w tabeli 6.2, przy czym rzeczywiste prędkości skrawania wynosiły około 200 m/min. Skrawanie realizowano bez udziału płynów obróbkowych, gdyż ich stosowanie jest ograniczane wobec coraz bardziej restrykcyjnych przepisów o ochronie środowiska [23]. Po skończonej obróbce mierzono bicie promieniowe walcowych powierzchni obrobionych przedmiotów. Następnie zdejmowano próbkę z uchwytu i przeprowadzano pomiary falistości, chropowatości, okrągłości oraz bicia poprzecznego tych powierzchni. Parametry falistości wyznaczano, mierząc profile na obwodzie próbek, w kierunku równoległym do śladów obróbki (rys. 6.16). Chropowatość określano na podstawie profilogramów, wyznaczanych na powierzchni próbki, wzdłuż jej osi (rys. 6.16). Parametry okrągłości i bicia poprzecznego mierzono w płaszczyźnie przekroju poprzecznego, prostopadłej do osi próbki. Wszystkie odchyłki wyznaczano w trzech płaszczyznach pomiarowych. Zestaw parametrów falistości, okrągłości, bicia poprzecznego i chropowatości wyznaczano, z użyciem oprogramowania będącego integralnym elementem każdego z przyrządów pomiarowych.

Do analizy wykorzystywano tylko wybrane parametry chropowatości, błędów kształtu i złożonych błędów kształtu i położenia: maksymalną wysokość chropowatości – R_p , maksymalną wysokość falistości – W_p , odchyłkę okrągłości względem środka okręgu średniego – ΔZ_q [198, 199] i odchyłkę bicia promieniowego całkowitego – ΔB_{tr} (rys. 6.17). Za miarodajne wartości odchyłek Δd^c , związanych z chropowatością powierzchni, przyjmowano wartości średnie arytmetyczne (z trzech pomiarów, wykonanych w różnych płaszczyznach obrobionej próbki) podwojonych wartości parametrów R_t (zależność (6.4)). W odniesieniu do odchyłek kształtu Δd^k , wywołanych błędami geometrycznymi i drganiami obrabiarki, przyjmowano średnie arytmetyczne podwojonych wartości parametrów W_t (zależność (6.5)). Do ustalenia wartości odchyłek Δd^c i Δd^k przyjmowano dlatego podwojone wartości parametrów R_t lub W_p , gdyż powierzchnie walcowe stykają się ze współpracującymi elementami z dwóch stron. Zastosowany przy-



Rys. 6.16. Schemat poglądowy kierunku przesuwu głowicy w pomiarze chropowatości i falistości przedmiotów próbnych

Fig. 6.16. Pictorial diagram of the stylus shift direction during measurements of the test pieces roughness and waviness

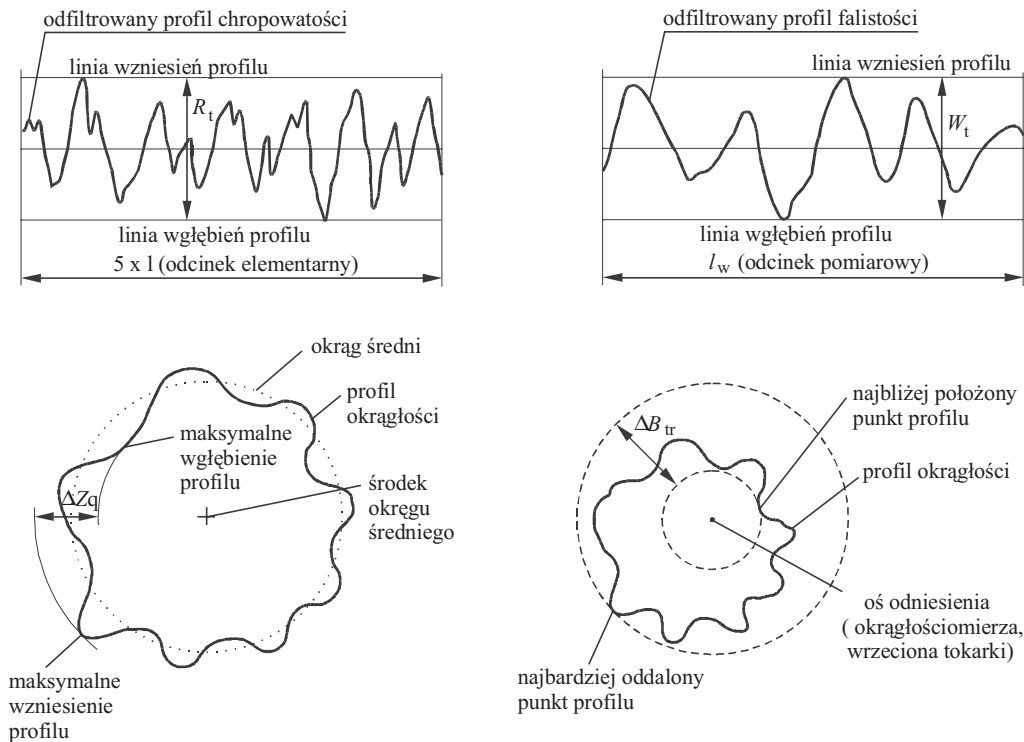
rzęd pomiarowy umożliwił wyznaczenie parametrów R_t lub W_p , dlatego stosowano je zamiast polskich odpowiedników R_m lub W_z . Parametry ΔZ_q i ΔB_{tr} analizowano w celach poglądowych.

$$\Delta d^c = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^3 R_{t,i} \quad (6.4)$$

$$\Delta d^k = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^3 W_{t,i} \quad (6.5)$$

Wartości wszystkich globalnych wskaźników oceny wyznaczano jako średnią ważoną odpowiednich wskaźników lokalnych (por. zależności (5.1), (5.3)–(5.6), (5.9)) określonych w polach elementarnych przyjętych za reprezentatywne (por. rys.6.13b)). Za współczynniki wag w każdym z tych pól przyjęto wyznaczone obliczeniowo prawdopodobieństwa wystąpienia siły skrawania. Do tego celu wykorzystano bazę danych przedmiotów obrabianych na tokarkach, z której wybrano tylko te przedmioty, które spełniały warunki gabarytowe i technologiczne narzuconych zadań obróbkowych. Do wyznaczania współczynników wag wykorzystano oprogramowanie wykonane w pracach [65, 69, 131].

Wartości odbiorczych wskaźników oceny wyznaczano w jednym punkcie przyjętej do analizy przestrzeni roboczej. Dla analizowanego zbioru przedmiotów była to średnica toczenia $\varnothing 87$ mm w odległości 47 mm od szczęk uchwytu, które to współrzędne



Rys. 6.17. Definicje analizowanych parametrów: maksymalnej wysokości chropowatości R_t i falistości W_t , odchyłek okrągłości względem środka okręgu średniego – ΔZ_q i bicia promieniowego całkowitego – ΔB_{tr}

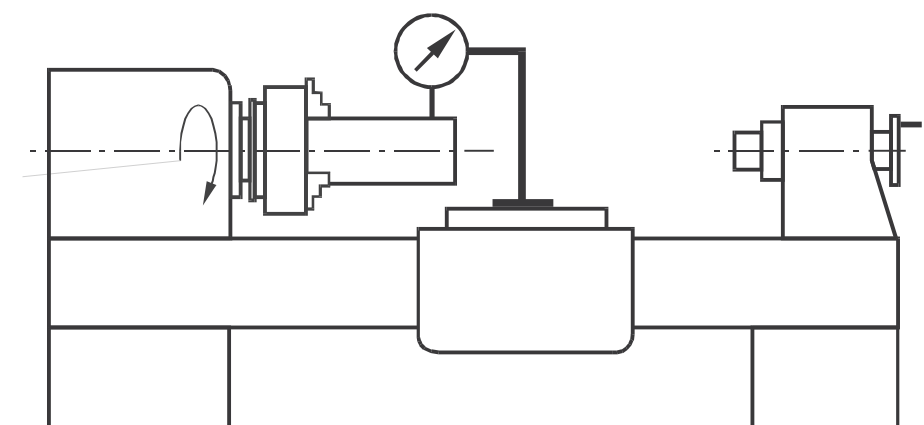
Fig. 6.17. Definitions of the analyzed parameters: maximal peak to valley height of the roughness profile R_t , and total waviness depth W_t , deviations of roundness relative to the least squares reference circle – ΔZ_q and deviations of the total radial runout – ΔB_{tr}

odpowiadały maksimum wyznaczonego rozkładu częstości występowania skrawania w całej, analizowanej przestrzeni roboczej. Maksimum to określano analitycznie, na podstawie aproksymacji wspomnianego rozkładu dwuwymiarowym rozkładem beta [7, 65, 69].

W obowiązujących obecnie warunkach badań odbiorczych tokarek dużą wagę przywiązuje się pomiarowi odchyłek bicia promieniowego wrzeciona, które w przypadku tych maszyn są jednym z najważniejszych wskaźników ich dokładności geometrycznej oraz wyznaczaniu odchyłek okrągłości przedmiotu obrabianego, decydujących z kolei o ocenie dokładności jego wykonania podczas badań pracą. Obie te odchyłki przyjmowane są a priori, w odniesieniu do uniwersalnych tokarek precyzyjnych (dla jednego zakresu średnic) lub pozostałych (dla dwóch zakresów średnic), w określonym miejscu pomiaru (przy powierzchni czołowej wrzeciona lub na końcu bazy ustalającej przedmiotu) [201]. W metodach badań odbiorczych tokarek jest więc stosowana jedna wartość dopuszczalnej odchyłki (bicia promieniowego lub okrągłości), niezależnie od

wielkości mierzonej średnicy. W odniesieniu do konkretnych wymiarów nominalnych nie obowiązują zatem szeregi tolerancji bicia i tolerancji okrągłości [193], które stosowane są w ogólnej budowie maszyn i ich zespołów.

Podczas kontroli geometrycznej obrabiarek [187] bicie promieniowe określa się przez pomiar bicia elementu zamontowanego w osi wrzeciona, np. trzpienia kontrolnego. Jest ono efektem bicia promieniowego osi, owalności elementu i promieniowego błędu przesunięcia osi obrotu (nie dokładności łożyskowania). W prezentowanej pracy mierzono bicie przedmiotu obrobionego zamocowanego w uchwycie trójścieżkowym (rys. 6.18), więc wcześniej wykonana operacja toczenia zmniejszyła efekt bicia poprzecznego tego uchwytu. Tolerancja bicia poprzecznego zawiera błędy kształtu powierzchni obrotowej,



Rys. 6.18. Schemat pomiaru bicia poprzecznego przedmiotu zamocowanego w uchwycie tokarki
Fig. 6.18. Measurement diagram of the radial runout of a workpiece clamped in the lathe's chuck

przesunięcia osi, nierównoległości osi tej powierzchni w stosunku do osi obrotu (błędy położenia) oraz ruchy osi obrotu (jeśli powierzchnie łożysk lub otworów nie są dokładnie kołowe) [187]. Należy zwrócić uwagę na to, że sprawdzanie bicia wrzeciona przez pomiar przedmiotu, po przeprowadzeniu wstępnej obróbki uwzględnia tylko niedokładności łożysk wrzeciona i nie daje informacji o dokładności kształtu otworu stożkowego lub stożkowej zewnętrznej powierzchni ustalającej. Tego typu pomiar nie zawiera więc pełnej informacji o niedokładności geometrycznej obrabiarki. Niedokładności te nie odzwierciedlają się na przedmiocie obrobionym w jednym zamocowaniu, ale mogą zwiększyć błędy położenia w przypadku dodatkowych zamocowań. Odchyłka bicia promieniowego całkowitego dotyczy całej powierzchni obrobionej i obejmuje odchyłkę walcowości i współosiowości [51], może więc być interesującym wskaźnikiem błędów złożonych kształtu i położenia, ale metody pomiarowe w jej przypadku wymagają dopracowania.

Pomiar okrągłości przedmiotu obrabianego przeprowadza się po próbach pracą. Odchyłka okrągłości jest więc wskaźnikiem zachowania się tokarki w warunkach eks-

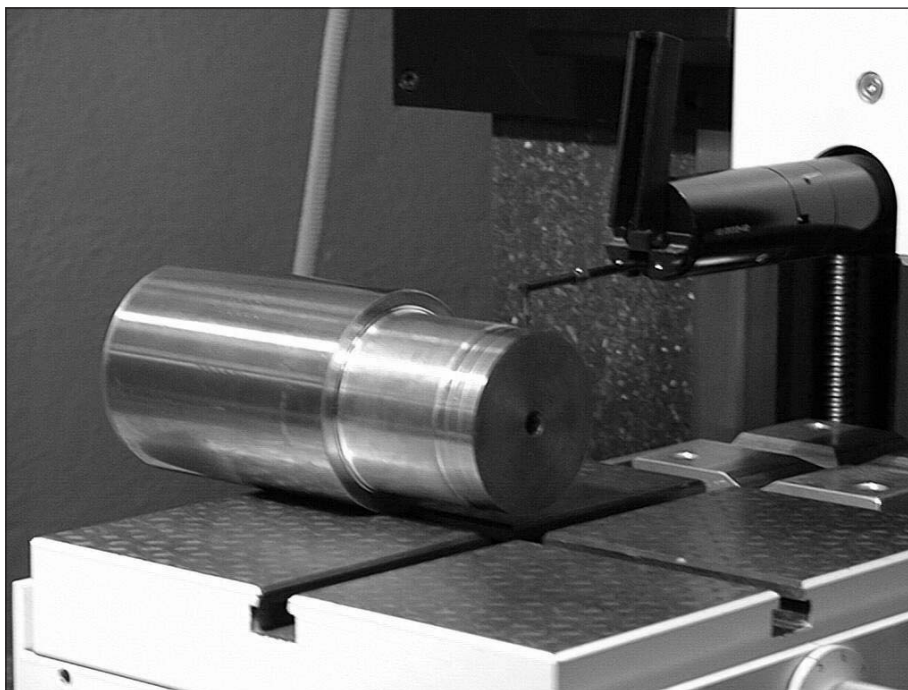
ploutacyjnych. Odzwierciedla ona wpływ błędów geometrycznych i drgań (własności dynamicznych) tej obrabiarki. W przypadku oceny przedmiotów walcowych wydaje się być bardziej miarodajna niż wysokość falistości wyznaczana tylko na pewnym ograniczonym odcinku pomiarowym na obwodzie przedmiotu. Dotychczas, w większości przypadków, dokładność powierzchni walcowych oceniano na podstawie odchyłek zarysu okrągłości, odniesionych do jednego przekroju poprzecznego sprawdzanego przedmiotu lub do odchyłek zarysu walcowości w kilku wybranych przekrojach poprzecznych [2]. W praktyce przemysłowej ocena walcowości dokonywana była na podstawie trzech szczególnych jej przypadków: baryłkowości, siodłowości i stożkowatości [2]. Współczesny proces technologiczny wymaga stałej kontroli powierzchni walcowych, ocenianych na podstawie odpowiednich parametrów, które odnoszą się również do całej powierzchni walcowej. Stosować między innymi można metodę pomiaru zarysu względem linii śrubowej o odpowiednio dobranych parametrach [2]. W niniejszej pracy okrągłość oceniana była w trzech przekrojach dla każdej powierzchni, która była obrabiana ze stałymi parametrami skrawania.

Parametry stosowane do promieniowej oceny okrągłości nie są wystarczające do oznaczenia funkcjonalnych własności przedmiotów obrobionych [26], dlatego w pracy nie wykorzystano ich w procedurze oceny. Brak jest pojedynczego parametru, który umożliwia dokładny opis profilu okrągłości. Informacje, które można uzyskać na podstawie profilu okrągłości można podzielić na dwa rodzaje parametrów, z których pierwszy jest odnoszony do amplitudy fali nierówności, a drugi do długości fali [26, 111]. W przedstawionej pracy charakterystyki tego profilu oceniano ilościowo, z użyciem odchyłki okrągłości względem środka okręgu średniego ΔZ_q , bądź jakościowo, biorąc pod uwagę liczbę fal nierówności na obrót [198], zawartych na obwodzie przedmiotu. Ocenia się, że minimalna liczba harmonicznych amplitudowego spektrum profilu okrągłości potrzebnych do scharakteryzowania toczonej powierzchni wynosi 10 [26].

6.7. PRYZRZĄDY, UKŁADY POMIAROWE I OPROGRAMOWANIE

Pomiary falistości i chropowatości powierzchni obrobionych przeprowadzono, dla wszystkich przyjętych próbek, na profilografometrze FORM TALYSURF 120L firmy Taylor Hobson (rys. 6.19). Pomiar odbywał się według zasady odwzorowywania zarysu profilu tych powierzchni za pomocą igły diamentowej (z ostrzem o promieniu zaokrąglenia $2 \mu\text{m}$), której przemieszczenia i wychylenia mierzone były z rozdzielczością 10 nm, z użyciem dwóch helowo-neonowych interferometrycznych czujników laserowych. Przyrząd ten umożliwia wyznaczenie ponad trzydziestu parametrów chropowatości i falistości profilu powierzchni [103], określanych w normach ISO, DIN i PN.

Profil chropowatości mierzono w kierunku prostopadłym do śladów obróbki. Przed wyznaczeniem parametrów chropowatości powierzchni zarejestrowanego profilu usuwano trend w postaci nachylenia tworzącej próbki względem osi ramienia pomiarowe-



Rys. 6.19. Pomiar falistości próbki na profilografometrze Form Talysurf 120L

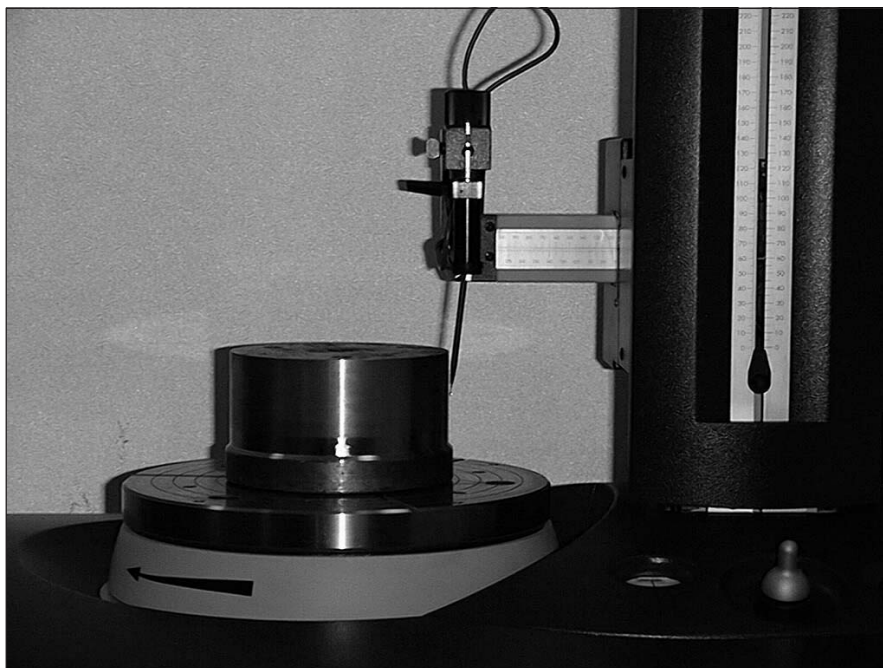
Fig. 6.19. Waviness measurement of the test piece using a Form Talysurf 120L profilometer

go i odfiltrowywano składowe harmoniczne nierówności zarysu profilu o długościach fal większych niż 0,8 mm, związanych z falistością powierzchni. Do filtracji sygnału pomiarowego zastosowano górnoprzepustowy filtr Gaussa o charakterystyce typu C (dla profili chropowatości), będący integralną częścią oprogramowania profilografometru [103]. Przyrząd pomiarowy był dobrze odizolowany od podłoża, co wykazały próbne pomiary, bez przesuwu głowicy pomiarowej. Niedokładności pomiaru profilu chropowatości powierzchni powstałe z powodu złej izolacji od drgań otoczenia mogą często znacznie przekraczać nierówności faktycznie występujące na tej powierzchni [162]. Spośród wyznaczonych parametrów chropowatości do oceny wykorzystywano maksymalną wysokość chropowatości R_r .

Pomiary falistości wykonywano na obwodzie próbek w kierunku równoległym do śladów obróbki. Ze względu na krótkie odcinki pomiarowe (od 5 do 25 mm) nie uwzględniano kąta pochylenia linii śrubowej utworzonej po przejściu wierzchołka narzędzia. Zarejestrowane dane były wstępnie przetwarzane z użyciem oprogramowania, dostępnego na komputerze obsługującym profilografometr. Polegało to na odfiltrowaniu trendu w postaci kołowości próbki oraz na odfiltrowaniu składowych harmonicznych nierówności zarysu profilu o długości mniejszej niż 0,8 mm, związanych z chropowatością powierzchni. Tak więc ocena falistości powierzchni dokonywana była na podstawie

danych uzyskanych z analizy długości fal większych niż 0,8 mm. Do filtracji danych pomiarowych zastosowano dolnoprzepustowy filtr Gaussa o charakterystyce typu C (dla profili falistości), będący integralną częścią oprogramowania profilografometru [103]. Po przeprowadzeniu obu filtracji wyznaczano zestaw parametrów falistości, z których do oceny wykorzystywano jedynie maksymalną wysokość falistości W_r .

Pomiary okrągłości obrobionych powierzchni walcowych przeprowadzono na okrągłościomierzu TALYROND TR 265 firmy Taylor Hobson (rys. 6.20). Wyposażony jest on w precyzyjny, ułożyskowany aerostaticznie stół obrotowy o średnicy $\varnothing 265$ mm, którego kąt obrotu mierzony jest z rozdzielczością 2000 punktów pomiarowych na obrót. Przyrząd ten umożliwia realizację automatycznego centrowania przedmiotu obrobionego w zakresie ± 5 mm i autopoziomowania w zakresie $\pm 1^\circ$, co nie tylko przyspiesza wykonywanie pomiarów, ale znacząco wpływa na ich dokładność. Ramię końcówki pomiarowej zakończone było kulką o średnicy 8 mm, która zarazem pełniła rolę filtra mechanicznego dla występujących na obwodzie przedmiotu fal nierówności o małej długości (chropowatości). Dołączony do końcówki pomiarowej przetwornik indukcyjny, o zakresie pomiarowym ± 1 mm, mierzył profil okrągłości z rozdzielczością 0,06 μm . Używany w badaniach okrągłościomierz ma wiele możliwości pomiaru innych błędów kształtu [25, 102], których wykorzystanie nie było w tej pracy konieczne.



Rys. 6.20. Pomiar okrągłości próbki na przyrządzie TALYROND TR 265

Fig. 6.20. Roundness measurement of the test piece using a TALYROND TR 265 roundness tester

Możliwość uproszczenia wstępnych pomiarów i dokonywania regulacji położenia mierzonego przedmiotu jest istotną zaletą okrągłościomierza TALYROND TR 265, gdyż mankamentem obecnie istniejących uniwersalnych urządzeń pomiarowych z wzorcową osią obrotu jest zbyt długi czas trwania pomiarów [1, 166]. Tradycyjne, wcześniej wyprodukowane, bezodniesieniowe przyrządy pomiarowe zarysów okrągłości i falistości powierzchni, w dużej mierze nie spełniają obecnie warunków przemysłu maszynowego [52]. Jest to związane z trudnościami z dokładnym wycentrowaniem przedmiotu na stole pomiarowym, koniecznością wykonywania oddzielnych pomiarów z zastosowaniem różnych filtrów, koniecznością częstej zmiany wzmocnienia, niewielką dokładnością otrzymywanych wydruków. Obecnie notuje się tendencję do budowania skomputeryzowanych systemów do wyznaczania okrągłości, które umożliwiają dokonywanie korekcy mierzonego zarysu, polegającej na odjęciu od zarysu zmierzonego znanego zarysu okrągłości wrzeciona (gdy dysponujemy atestowanym wzorcem o znanym zarysie) [52].

W trakcie przeprowadzanych badań okrągłościomierz stosowano do pomiaru profilu walcowej powierzchni obrobionej, w przekroju poprzecznym prostopadłym do wzorcowej osi stołu. Profile te poddawano modyfikacji, stosując filtry [184, 199] przenoszące fale nierówności w zakresie od 2 do 15 fal na obrót przedmiotu lub w zakresie od 15 do 150 fal. Zmodyfikowane profile były podstawą do wyznaczania odchyłek okrągłości ΔZ_q względem środka okręgu średniego oraz odchyłek bicia poprzecznego ΔB_{tr} (względem wzorcowej osi przyrządu). Do wyznaczenia tych odchyłek wykorzystano oprogramowanie będące integralnym wyposażeniem przyrządu.

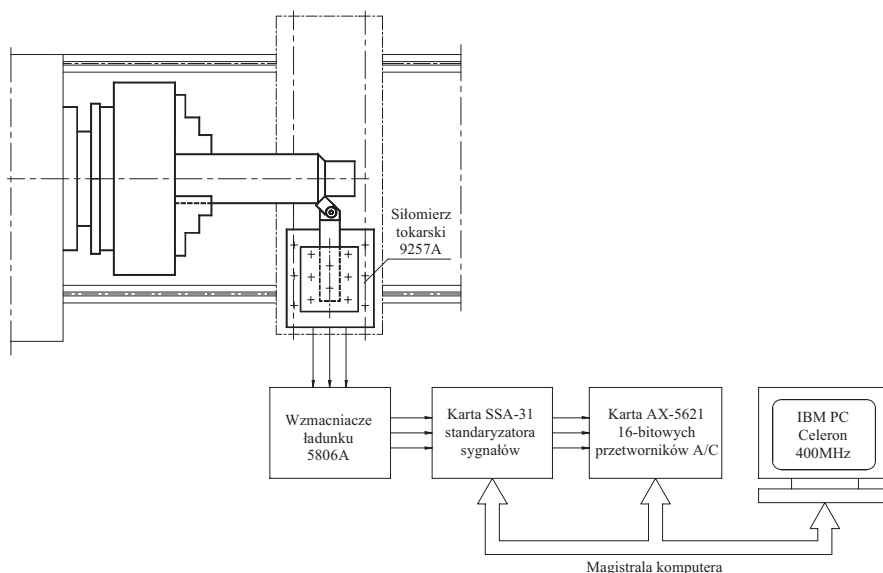
W przypadku przedmiotów walcowych ważnym aspektem procesu produkcyjnego jest analiza składowych harmonicznych długości fal nierówności występujących na powierzchni obrobionej. Harmoniczne te są pochodną kombinacji geometrii składników, własności materiału i metody wytwarzania. Ogólnie, można je pogrupować następująco [102]:

- 1 harmoniczna (pochodna pomiaru) – jest spowodowana tylko przez błędy nastaw przyrządu używanego do pomiaru okrągłości; amplituda tej harmonicznej jest równa niewspółosiowości przedmiotu względem osi wrzeciona (lub stołu obrotowego),
- 2 harmoniczna (pochodna pomiaru albo wytwarzania) – jest ogólnie nazywana owalnością i może być spowodowana zarówno przez nastawy przyrządu pomiarowego, jak i przez przedmiot, który nie jest obrabiany prostopadle do jego osi obrotu,
- 3–7 harmoniczne (pochodna wytwarzania) – są zazwyczaj spowodowane przez sposób mocowania przedmiotu,
- 7–15 harmoniczne (pochodna wytwarzania) – są spowodowane ogólnie przez sposób wytwarzania i stabilność procesu obróbki,
- powyżej 15 harmonicznej (pochodna materiału i wytwarzania) – są spowodowane zarówno przez niestabilność obrabiarki, jak i przez interakcje stosowanego materiału, narzędzia skrawającego i cieczy obróbkowej.

We współczesnym przemyśle do pomiaru i oceny okrągłości stosuje się przyrządy bezpośrednio zamocowane na obrabiarce lub na produkcyjnym stanowisku badawczym,

wykorzystujące metody odniesieniowe. Dają one w rezultacie zarys zmierzony znacznie odbiegający od rzeczywistego. Może to prowadzić do dużych błędów w ocenie odchyłki okrągłości [1]. Podobnie, w przypadku pomiaru chropowatości z użyciem technik pomiarowych bez użycia końcówki prowadzącej, z wystarczającą dokładnością można oszacować parametr R_a , ale poprawne wyznaczenie wartości R_z nie jest możliwe [142]. W związku z tym, stosowane podczas procesu obróbki bezdotykowe metody pomiaru parametrów stereometrii powierzchni obrabianej i odchyłek wymiarowych, pozostają wciąż w fazie prób laboratoryjnych [142]. Żaden układ adaptacyjny do sterowania w czasie rzeczywistym parametrami jakości powierzchni obrabianej i dokładności wymiarowej nie został zaimplementowany w warunkach przemysłowych [9].

Do przeprowadzenia badań dodatkowych, polegających na wyznaczeniu składowych siły skrawania, zestawione zostało stanowisko badawcze (rys. 6.21), które umożliwiło jednoczesny pomiar trzech składowych siły w niezależnych kanałach pomiarowych. Nóż tokarski mocowany był w imaku trójskładowego siłomierza tokarskiego 9257A, który współpracował ze wzmacniaczami ładunku 5806A firmy KISTLER. W czasie pomiarów wykorzystywano wszystkie kanały pomiarowe siłomierza, rejestrując trzy składowe siły skrawania. Sygnały siły były przetwarzane przez dwie wielokanałowe karty pomiarowe zamontowane w komputerze klasy IBM PC: kartę standaryzatora sygnałów analogowych SSA-31 firmy ALFINE oraz kartę przetworników A/C i C/A – AX5621 firmy Axiom z oprogramowaniem do analizy sygnałów. Obie karty obsługiwane były programowo przez komputer. Karta SSA-31 umożliwiała regulację wzmocnienia i regulację poziomu sygnału w wybranych kanałach. Karta AX5621 pozwalała



Rys. 6.21. Schemat stanowiska badawczego z układem do pomiaru składowych siły skrawania

Fig. 6.21. Experimental set-up for measuring components of the cutting force

na dyskretyzację mierzonych sygnałów z 16-bitową rozdzielczością i z zadawaną programowo częstotliwością próbkowania. W pomiarach stosowano oprogramowanie do akwizycji danych i analizy sygnałów firmy CONVERT. Składowe stałe siły skrawania wyznaczano jako wartości skuteczne sygnałów siły zmierzonych podczas wzdluznego skrawania próbki na odcinku ok. 5 mm.

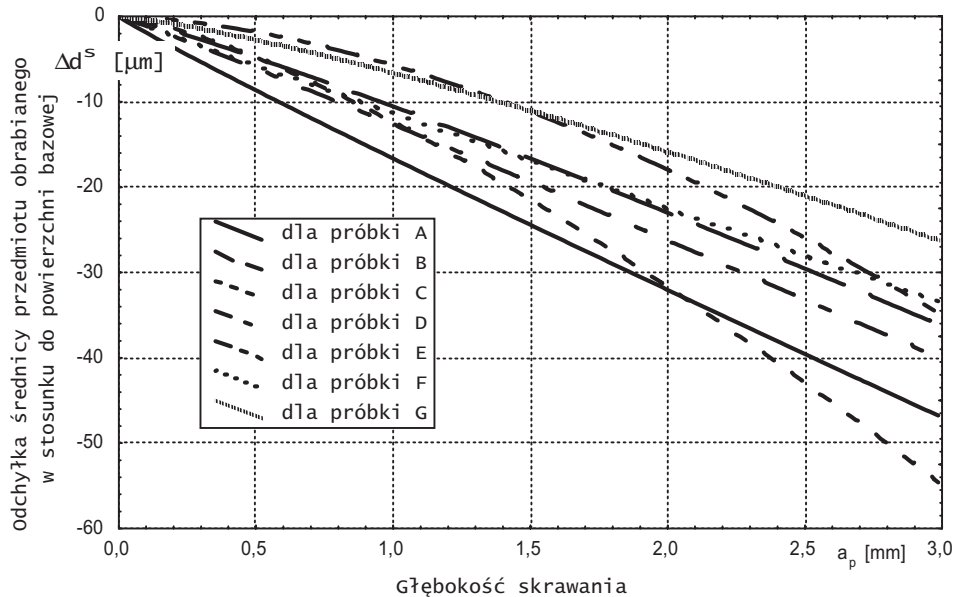
Należy podkreślić, że pomiar sił skrawania wykonano dla wcześniej wymienionych celów poznawczych (por. rozdz.6.6.). Nie był on elementem niezbędnym do przeprowadzenia oceny obrabiarki na podstawie dokładności wymiarowo-kształtowej powierzchni przedmiotu obrabianego, uzyskanej w warunkach obróbki wykańczającej. Dostarczył jedynie podstaw do wnioskowania o przydatności tych pomiarów do obliczeniowych metod analizy własności tokarek i ekstrapolacji zmierzonych sił do innych warunków skrawania (dla większej głębokości toczenia).

Do wyznaczania wskaźników oceny analizowanej tokarki opracowano oprogramowanie, które umożliwiało obliczanie lokalnych i globalnych wskaźników oceny, z wykorzystaniem pełnej lub częściowej informacji o zmierzonych odchyłkach wymiarowych. Do przeglądania i sortowania przedmiotów obrabianych według przyjętych kryteriów oraz do tworzenia zbiorów wynikowych wykorzystano oprogramowanie wykonane w pracach [65, 66, 69, 70]. Wyznaczanie rozkładu obciążeń w przestrzeni roboczej tokarki, współczynników wag i maksimum dwuwymiarowego rozkładu beta, stosowanych w procedurze oceny, zrealizowano z użyciem oprogramowania wykonanego w ramach pracy [65, 69, 131]. W programie firmy CONVERT do obsługi akwizycji danych i opracowania wyników pomiarów, stosowanym podczas wyznaczania składowych siły skrawania, wykorzystano elementy oprogramowania systemu do badań dynamicznych [129].

6.8. WYZNACZANIE WSKAŹNIKÓW OCENY I ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

6.8.1. ANALIZA I OCENA WŁASNOŚCI STATYCZNYCH OBRABIAREK

Własności statyczne tokarki oceniano na podstawie zmian odchyłek średnicy toczenia, spowodowanych działaniem obciążeń związanych ze skrawaniem różnych próbek dla zmieniających się skokowo głębokości skrawania. Odchyłki te określano względem średnicy powierzchni odniesienia przedmiotu, obrabianego przy minimalnych oddziaływaniach siłowych ($a_p = 0,05$ mm, $f = 0,08$ mm/obr). Odchyłki te zmierzono dla głębokości skrawania 1, 2 i 3 mm. Dla każdej z próbek wykonano charakterystykę (rys. 6.22) przedstawiającą zależność odchyłki średnicy toczenia Δd^s od głębokości skrawania a_p . Charakterystyki te powstały w wyniku aproksymacji danych pomiarowych krzywą potęgową (por. zależność (6.2)). Na podstawie tych krzywych oszacowano wartości odchyłek Δd^s , jakie odpowiadałyby skrawaniu próbek z głębokością $a_p = 0,5$ mm, stosowaną w obróbce wykańczającej. W badaniach zastosowano pośredni sposób wy-

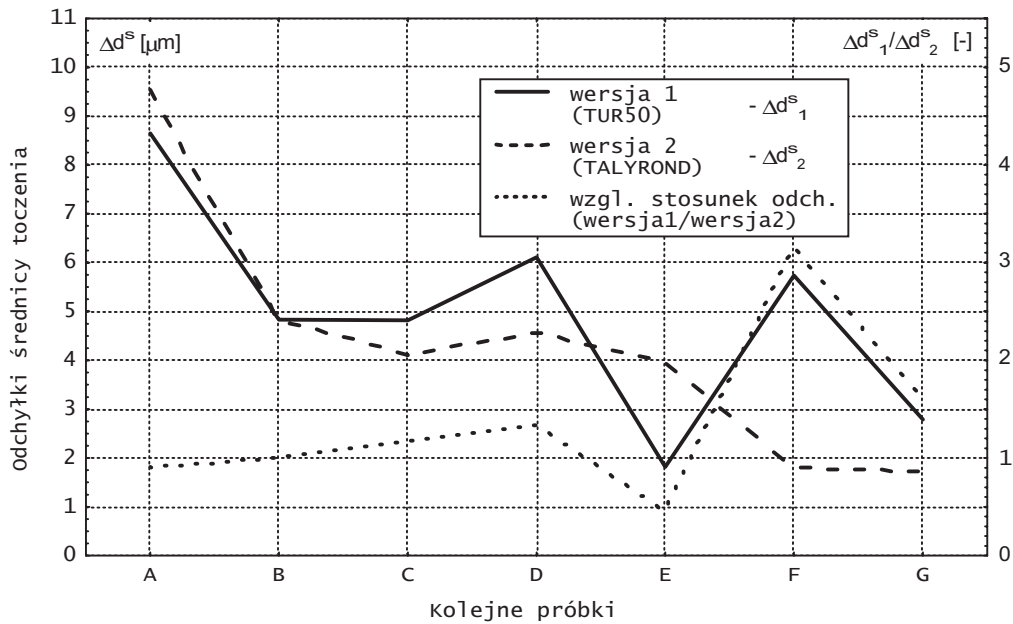


Rys. 6.22. Zależność odchyłki średnicy Δd^s różnych przedmiotów próbnych od głębokości skrawania a_p , wyznaczona w stosunku do średnicy walcowej powierzchni odniesienia każdego z przedmiotów
 Fig. 6.22. Dependence of the deviation of diameter Δd^s of various test pieces on the depth of cut a_p , measured relative to the diameter of the cylindrical reference surface of each workpiece

znaczania odchyłek średnicy dla tej głębokości, gdyż w bezpośredniej metodzie pomiarowej występowały zbyt małe wartości odchyłek, aby przy rozdzielczości czujnika zegarowego 1 μm można je było określić z wystarczającą dokładnością.

Wartości odchyłek średnicy Δd^s , odpowiadające obróbce wykańczającej, oszacowano zarówno dla pomiarów wykonanych bezpośrednio na obrabiarce, jak i tych, które zrealizowano na okągłościomierzu. Ich zestawienie dla różnych próbek przedstawiono na rys. 6.23. Zwraca uwagę bardzo dobra zgodność obu metod wyznaczania odchyłki średnicy Δd^s dla przedmiotów toczonych w małej odległości od szczęk uchwytu (próbki A, B i C). Pogarsza się ona ze wzrostem tej odległości (próbki F i G). Wynika to bezpośrednio z różnic charakterystyk (rys. 6.24) wyznaczonych na podstawie pomiarów próbki zamocowanej w uchwycie tokarki i umieszczonej na okągłościomierzu. Dla obu wariantów pomiarów, na wykresach tych podano również współczynniki aproksymowanych funkcji, na podstawie których wyznaczono odchyłki średnicy Δd^s . Większy rozrzut odchyłek przy dużym wysięgu przedmiotu obrabianego sugeruje, że na wynik pomiaru mogły mieć wpływ błędy położenia osi analizowanego przekroju próbki.

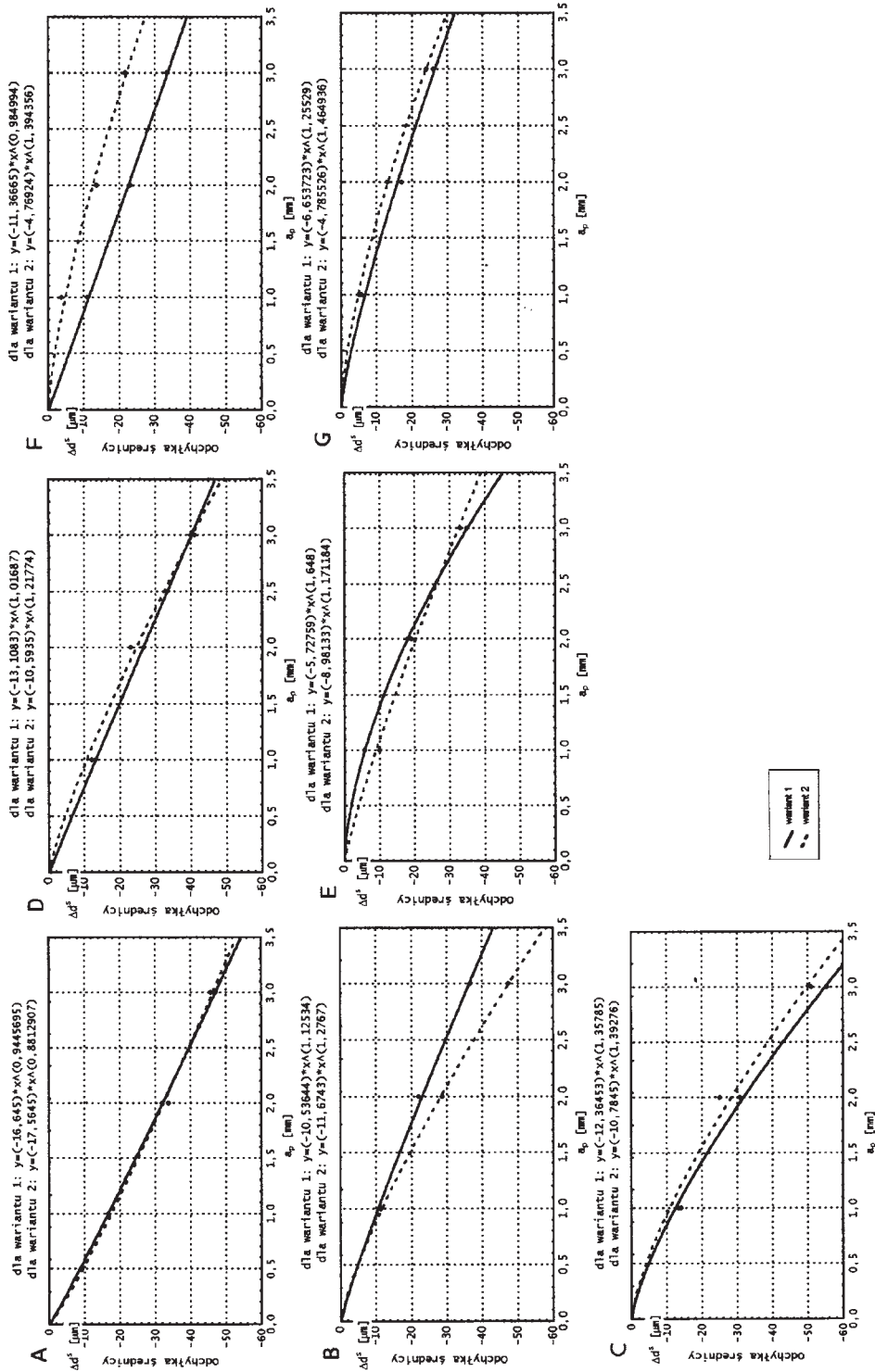
W przypadku pomiarów wykonywanych na tokarce, zmiany położenia osi przedmiotu mogły wynikać z błędów ułożyskowania. W odniesieniu do wyników uzyskanych na okągłościomierzu błędy pomiarowe mogły być związane z trudnościami z dokładnym ustawieniem osi przedmiotu w osi wzorcowej stołu przyrządu. Wyznaczone wartości



Rys. 6.23. Porównanie odchyłek średnicy Δd^s , odpowiadających obróbce wykańczającej, wyznaczonych dla różnych próbek, podczas zamocowania w uchwycie tokarki (wariant 1) lub umieszczenia na stole okrągłościomierza (wariant 2) dla wszystkich próbek (A–G)

Fig. 6.23. Comparison of dimensional deviations Δd^s due to finishing conditions, determined for various test pieces clamped in the lathe's chuck (variant 1) or placed on the table of the roundness measuring device (variant 2) for all workpieces (A–G)

współczynników wag w_{ij} (por rys. 6.13b) i odchyłek średnicy Δd^s posłużyły do określenia ekwiwalentnej całkowitej odchyłki średnicy ΔD , związanej z odkształceniami statycznymi układu (por. zależność (5.4.)). Z zależności (5.1) obliczono wartości lokalnych wskaźników oceny dla każdej z wybranych (por. rys. 6.13b) podprzestrzeni roboczych (tabela 6.3). W obliczeniach uwzględniono odchyłki Δd^s , wyznaczone w wyniku pomiarów przedmiotu w dwóch różnych warunkach: zamocowanego na tokarce i umieszczonego na stole okrągłościomierza. Wśród wskaźników lokalnych W_{ij} zwraca uwagę to, że ich wartości na ogół maleją ze wzrostem wysięgu przedmiotu obrabianego lub jego średnicy. Świadczy to o polepszającej się, relatywnie, klasie dokładności wykonania (mniejsze liczbowe wartości), ze względu na własności statyczne układu konstrukcyjnego tokarki. W przypadku wzrastającej średnicy przedmiotu, większa klasa dokładności wymiarowej może wynikać z działania momentu zginającego, pochodzącego od siły posuwowej F_p kompensującego zmiany odchyłki średnicy Δd^s , spowodowane siłą odporową F_p . Podobne działanie wykazuje wypadkowa siła od napędu głównego F_N , która w analizowanej tokarce przeciwdziała zginaniu wrzeciona, powodowanemu przez siłę F_p .



Rys. 6.24. Porównanie zmian odchyłek wymiarowych Δd^s w zależności od głębokości skrawania a_p dla wszystkich badanych próbek (A–G)
 Fig. 6.24. Comparison of the dimensional deviations Δd^s depending on the cutting depth a_p for all tests pieces (A–G)

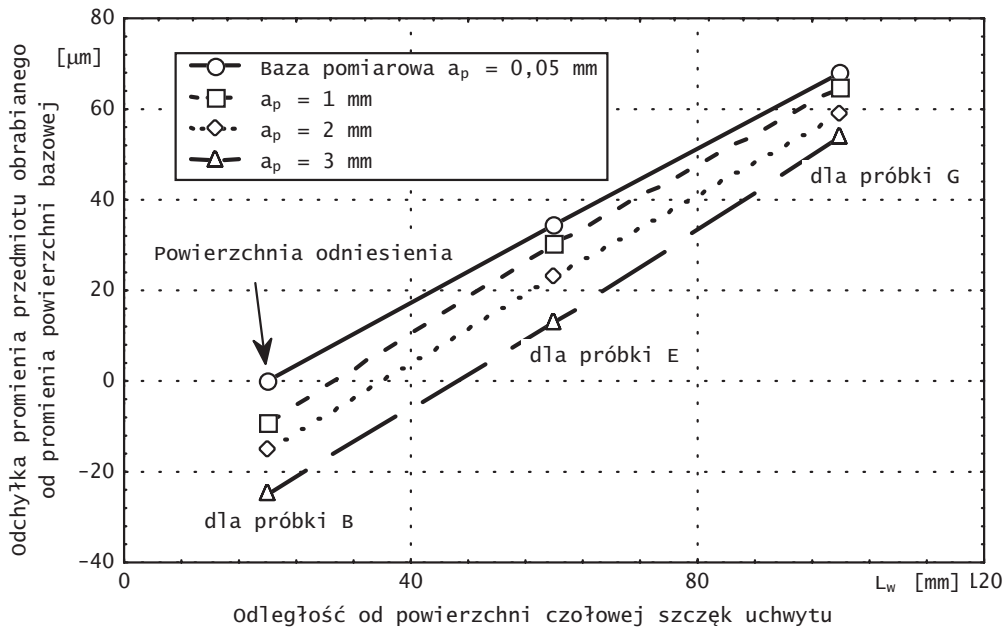
Tabela 6.3. Odchyłki wymiarowe Δd^s przedmiotów obrobionych, spowodowane odkształceniami statycznymi układu konstrukcyjnego tokarki, jakie wystąpiły w warunkach obróbki wykańczającej oraz lokalne wskaźniki oceny własności statycznych W_{ij}^s wraz ze współczynnikami wag w_{ij} dla pomiarów wykonanych: (a) bezpośrednio na tokarce (wariant 1), (b) na okrągłościomierzu (wariant 2)

Table 6.3. Dimensional deviations Δd^s of the test pieces resulting from the static deformation of the lathe's structure occurring under finishing conditions and the local assessment indexes of the static properties W_{ij}^s with weight factors w_{ij} for measurements directly taken: (a) on the lathe (variant 1), (b) on the roundness measuring device (variant 2)

Zakres średnic toczenia (średnica rzeczywista) [mm]	Współczynnik wagi Odchyłka wymiaru Wskaźnik oceny		Zakres odległości od powierzchni czołowej szczęk uchwyty L_w [mm]		
			0–40	40–80	80–120
Ø50–Ø80 (D = 70)	wariant 1 (TUR50)	w_{ij}	0,25	0,23	0,06
		Δd^s	8,65µm	6,11µm	5,74µm
	W_{ij}^s	7,20	6,45	6,31	
	wariant 2 (TALYROND)	Δd^s	9,53µm	4,56µm	1,81µm
W_{ij}^s		7,41	5,81	3,81	
Ø80–Ø120 (D = 109)	wariant 1 (TUR50)	w_{ij}	0,23	0,08	0,05
		Δd^s	4,83µm	1,82µm	2,79µm
	W_{ij}^s	5,61	3,49	4,41	
	wariant 2 (TALYROND)	Δd^s	4,81µm	3,99µm	1,73µm
W_{ij}^s		5,60	5,19	3,38	
Ø120–Ø180 (D = 154)	wariant 1 (TUR50)	w_{ij}	0,10	0	0
		Δd^s	4,82µm	—	—
	W_{ij}^s	5,34	—	—	
	wariant 2 (TALYROND)	Δd^s	4,11µm	—	—
W_{ij}^s		5,00	—	—	

Trudniej jest wytłumaczyć zmniejszającą się odchyłkę wymiarów przy większym wysięgu przedmiotu. Jest to prawdopodobnie wynikiem nakładania się przeciwstawnego wpływu na odchyłkę Δd^s położenia wypadkowej siły skrawania F względem powierzchni czołowej szczęk uchwytu L_w i głębokości skrawania a_p (rys. 6.25). Po przetoczeniu w jednym przejściu, długiego stopniowanego przedmiotu, na którym wykonano stopnie odpowiadające łącznie próbkom B, E i G (por. tabela 6.1), stwierdzono, że wzrost głębokości skrawania powodował zmniejszanie się średnicy obrobionego przedmiotu, a skrawanie przedmiotu przy większym wysięgu α_w jej zwiększenie. Wszystkie pomiary wykonano w odniesieniu do powierzchni bazowej próbki B.

Globalny wskaźnik oceny własności statycznych W_g^s przyjął wartość 5,99 dla pomiarów wykonanych bezpośrednio na tokarce, a wartość 5,79 wyznaczono w wyniku pomiarów zrealizowanych na okrągłościomierzu. Oznacza to, że gdyby nie brać pod uwagę innych czynników, wówczas własności statyczne analizowanej tokarki umożli-



Rys. 6.25. Zależność odchyłki promienia Δr od różnych głębokości skrawania a_p i od odległości miejsca skrawania od powierzchni czołowej szczęk uchwytu, zmierzona w stosunku do promienia walcowej powierzchni odniesienia próbki B

Fig. 6.25. Deviations of radius Δr of the test pieces depending on the cutting depth a_p and on the distance of the cutting point from the face surface of gripping jaws of the chuck, measured relative to the radius of the cylindrical reference surface of specimen B

wiałyby obróbkę przedmiotów w 6 klasie dokładności ISO. Dla tokarek przyjmuje się, że dokładność obróbki wykańczającej mieści się w 6 i 7 klasie ISO. Wynika stąd, że własności statyczne badanej tokarki spełniają, w myśl wyznaczonego globalnego wskaźnika oceny W_g^s , stawiane jej wymagania związane z dokładnością obróbki. Należy jednak zwrócić uwagę, że lokalne wskaźniki, obliczone w jednym z przyjętych elementarnych pól obróbki ($0 \leq L_w \leq 40$ mm, $50 \text{ mm} \leq D \leq 80$ mm), przekraczały wartość 7, czyli dopuszczalną klasę dokładności ISO. Ze względu na niewielkie przekroczenie dopuszczalnej wartości wskaźnika lokalnego wydaje się, że stosunkowo łatwo można go poprawić (zmniejszyć) przez działania obsługowe, polegające na sprawdzeniu i ewentualnej korekcji luzów w przednim węźle łożyskowym i na prowadnicach. Poprawa własności statycznych nie będzie prawdopodobnie wymagała zmian konstrukcyjnych.

Różnice w wyznaczonych globalnych wskaźnikach oceny W_g^s wynikały z faktu pomiaru odchyłek średnicy przedmiotu obrabianego Δd^s w różnych warunkach – w przypadku jego zamocowania w uchwycie obrabiarki i umieszczenia na stole obrotowym okrągłościomierza (por. rys. 6.23). Uzyskano dobrą zgodność obu wskaźników. Zdecydowały o tym stosunkowo małe różnice odchyłek Δd^s (względny stosunek odchyłek

bliski jedności) dla próbek A–C, obrabianych dla małego wysięgu (por. rys. 6.23), dla których współczynniki wag w_{ij} przyjmowały duże wartości. Większy rozrzut odchyłek Δd^s dla próbek E i F (por. tab. 6.3 i rys. 6.23) nie wpłynął znacząco na wartość wskaźnika W_g^s ze względu na małe wartości współczynników wag w_{ij} .

Celowe jest jednak podjęcie kroków zmierzających do modyfikacji metody pomiaru odchyłek Δd^s , polegającej na wprowadzeniu ciągłego odczytu względnych przemieszczeń między czujnikiem (mocowanym obok narzędzia) a przedmiotem (zamocowanym w uchwycie) po przeprowadzeniu skrawania stopniowanej próbki. Pomiar taki może odbywać się przy bardzo małej prędkości obrotowej wrzeciona i włączonym posuwie. Za miarę odchyłek promienia toczenia można przyjąć różnice między wartościami skutecznymi sygnału z badanej powierzchni w stosunku do powierzchni odniesienia. W nowej metodzie pomiarowej konieczne jest wprowadzenie korekcji błędów ułożyskowania wrzeciona. Błędy te można uwzględnić, stosując wcześniejszy pomiar elementu wzorcowego, zamocowanego na tym wrzecionie. Dodatkowym uzasadnieniem wprowadzenia takiej metody pomiaru jest fakt, że przyrządy z obrotowym stołem lub obrotowym wrzecionem nie mogą być wprost używane podczas produkcji ze względu na małą wydajność pomiaru [2]. We współczesnym przemyśle muszą być stosowane przyrządy albo bezpośrednio na obrabiarce, albo na produkcyjnym stanowisku badawczym, wykorzystujące odniesieniowe metody pomiaru [2].

Odbiorczy wskaźnik oceny własności statycznych W_o^s wyznaczono w miejscu odpowiadającym położeniu maksimum rozkładu częstości występowania siły skrawania w przestrzeni roboczej tokarki. Średnica toczenia wynosiła 87 mm, a odległość od szczęk uchwytu 47 mm. Wskaźnik W_o^s przyjął wartość 6,49 (odchyłka średnicy $\Delta d^s = 6,73 \mu\text{m}$). Zgodnie z tym wskaźnikiem własności statyczne badanej tokarki umożliwiałyby obróbkę przedmiotów w 7 klasie dokładności ISO, a więc w zakresie dokładności dopuszczalnych dla obróbki wykańczającej na tokarkach średniej wielkości. Wynika stąd, że własności statyczne badanej tokarki spełniają stawiane jej wymagania dotyczące dokładności obróbki.

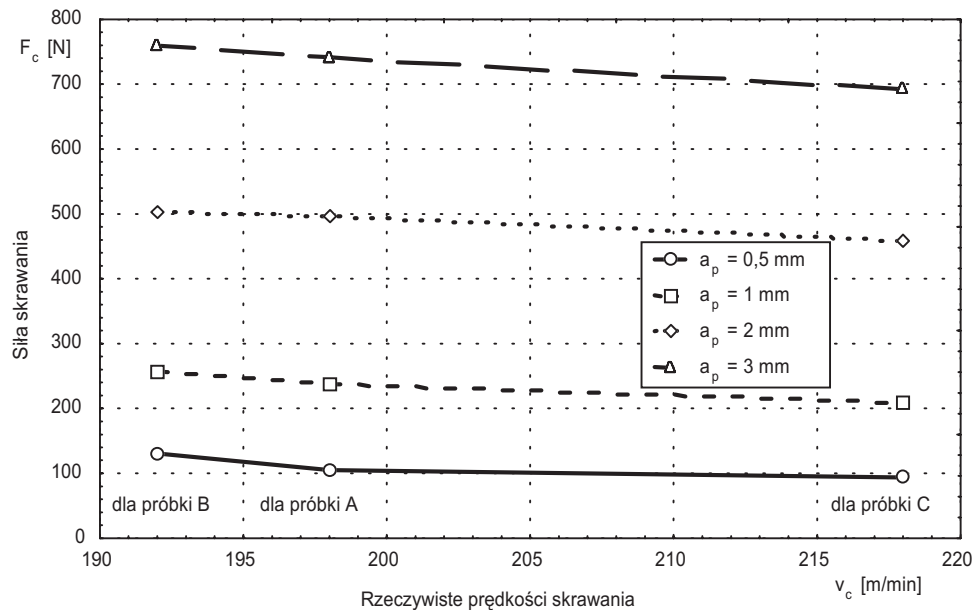
Przedstawiona metoda oceny własności statycznych na podstawie efektów obróbki przedmiotów próbnych nie wymaga znajomości konkretnych wartości składowych siły skrawania. Znajomość tych wartości i wzajemnego ich stosunku jest natomiast konieczna do analizy obliczeniowej i do oceny przydatności wyznaczonych charakterystyk $\Delta d^s(a_p)$ (por. rys. 6.22) do ekstrapolacji. Celem ekstrapolacji jest wyznaczenie odchyłek Δd^s dla głębokości toczenia a_p , odpowiadających maksymalnej sile skrawania. Pomiaru składowych siły skrawania przeprowadzono na tej samej tokarce i z użyciem tego samego narzędzia, które stosowano do obróbki przedmiotu próbnego, ale układ konstrukcyjny był zmieniony przez zastąpienie imaka narzędziowego siłomierzem tokarskim.

Wartości składowych stałych siły skrawania wyznaczono na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunku 6.21, podczas toczenia stopniowanych próbek (por. rys. 6.15) o gabarytach podanych w tabeli 6.1 z parametrami obróbki ujętymi w tabeli 6.2. Zmierzone wartości poszczególnych składowych stałych siły skrawania i ich wzajem-

ne stosunki podano w tabeli 6.4. Różnice wartości tych składowych, wyznaczone dla różnych próbek dla tej samej głębokości skrawania, wynikały z niewielkich różnic rzeczywistych prędkości skrawania. Prędkości te starano się utrzymać w zakresie około 200 m/min, na ile pozwalały na to stopnie prędkości obrotowych napędu głównego. Siła skrawania F_c w niewielkim stopniu malała wraz ze wzrostem rzeczywistej prędkości skrawania v_c , niezależnie od głębokości skrawania a_p (rys. 6.26). Można tym tłumaczyć pozorną zależność składowych siły skrawania od średnicy próbki (tab. 6.4).

Zmiana głębokości skrawania a_p bardziej wpływa na składową odporową F_p i tym samym zmienia wzajemne stosunki wszystkich składowych siły skrawania. Ekstrapolacja zależności tych składowych od głębokości skrawania do wyznaczenia takich głębokości toczenia a_p , które odpowiadałyby maksymalnej sile skrawania F_{cmax} , obarczona byłaby zbyt dużym błędem ze względu na nieliniowy charakter tych zależności.

Do obliczeń własności statycznych tokarek mogą zostać wykorzystane zmierzone wartości składowych siły skrawania odpowiadające parametrom obróbki wykańczającej. Przyjęcie tych sił jako obciążeń statycznych w modelu obliczeniowym umożliwi zastosowanie wprowadzonej metody oceny w procesie konstruowania obrabiarki. Aby uprościć obliczenia można przyjąć, że dla wszystkich próbek wartości składowych siły skrawania są stałe i odpowiadają średnim arytmetycznym sił zmierzonych podczas



Rys. 6.26. Zależność siły skrawania F_c od rzeczywistych prędkości skrawania v_c wyznaczona podczas obróbki próbek A–C z różnymi głębokościami toczenia a_p

Fig. 6.26. Deviations of cutting force F_c depending on the real cutting speed v_c determined during machining of the test pieces A–C with various cutting depth a_p

obróbki przedmiotów próbnych o różnych średnicach, ale stałej głębokości skrawania 0,5 mm. Do obliczeń można więc przyjąć $F_c : F_p : F_f = 110 \text{ N} : 96 \text{ N} : 62 \text{ N}$.

Analiza wyznaczonych charakterystyk zależności $\Delta d^s(a_p)$ (por. rys. 6.22 i 6.24) dowodzi, że są one nieprzydatne w ekstrapolacji do wyznaczenia odchyłek dla głębokości toczenia odpowiadających maksymalnej sile skrawania $F_{c\max}$. Wiąże się to przede wszystkim z ich nieliniowością (w zakresie małych obciążeń), lecz także z tym, że ze wzrostem głębokości skrawania zmienia się wzajemny stosunek składowych siły skrawania $F_c : F_p : F_f$ (por. tab. 6.4). Ponieważ każda z tych składowych oddziałuje bezpośrednio lub pośrednio na względne przemieszczenia między przedmiotem obrabianym a narzędziem, w kierunku przyjętym dla toczenia za „wrażliwy”, odchyłki średnicy toczenia Δd^s , odpowiadające maksymalnej sile skrawania, powinny być jednak wyznaczane bezpośrednio podczas obciążania układu konstrukcyjnego siłą $F_{c\max}$ lub maksymalną siłą F_c , dopuszczalną ze względu na własności sprężyste przedmiotu.

Aby możliwe było wykorzystanie pełnej mocy lub maksymalnego momentu na wrzecionie, występujące odchyłki nie powinny przekraczać wartości dopuszczalnych, odpowiadających wymiarom nietolerowanym przedmiotu [65, 194]. W przypadku przedmiotów obrabianych na tokarkach odpowiada to 12 klasie dokładności (por. rys. 6.2). Dopuszczalna wartość wskaźnika oceny własności statycznych W_{dop}^s , odpowiadająca maksymalnemu momentowi na wrzecionie lub wykorzystaniu pełnej mocy wynosi więc również 12. Gdyby dla dużych obciążeń założyć liniowość układu [156], wtedy dla dowolnej (dużej) siły wartość wskaźnika W_{dop}^s , odpowiadająca obciążeniu maksymalną siłą skrawania $F_{c\max}$, można wyznaczyć z zależności [65]

$$W_{dop}^s = 5 \log \left(\frac{F_c}{F_{c\max}} \right) + 12 \leq 12 \quad (6.6)$$

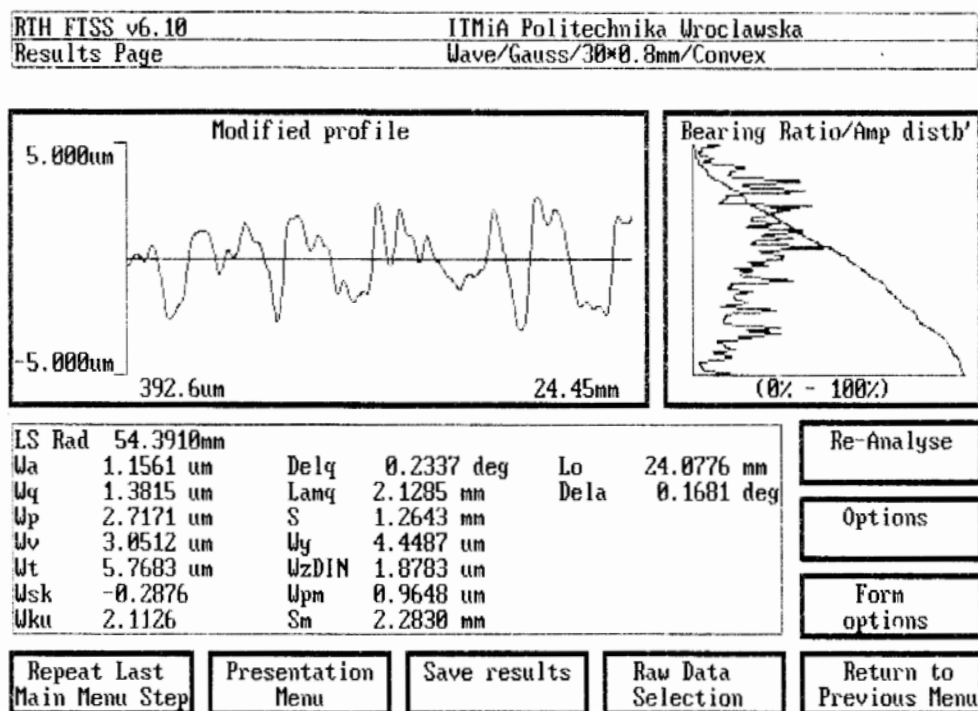
Tabela 6.4. Wartości składowych stałych siły skrawania zmierzone podczas toczenia próbek o różnych średnicach dla zmieniającej się głębokości skrawania a_p oraz wzajemne stosunki wartości tych składowych

Table 6.4. Values of cutting force components measured during turning of various test pieces while the cutting depth a_p and the relative ratios of these components were changed

Głębokość skrawania a_p [mm]	Próbka A (Ø70 mm)			Próbka B (Ø109 mm)			Próbka C (Ø154 mm)		
	F_c [N]	F_p [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_p [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_p [N]	F_f [N]
0,5	104,9	94,2	65,2	130,7	100,9	63,8	93,4	94,1	58,4
	1,6 : 1,4 : 1,0			2,0 : 1,6 : 1,0			1,6 : 1,6 : 1,0		
1,0	237,6	164,3	142,7	257,0	169,1	135,9	207,9	168,1	133,4
	1,7 : 1,2 : 1,0			1,9 : 1,2 : 1,0			1,6 : 1,2 : 1,0		
2,0	495,4	307,2	292,6	503,9	311,5	288,8	458,4	318,0	276,0
	1,7 : 1,0 : 1,0			1,7 : 1,1 : 1,0			1,7 : 1,2 : 1,0		
3,0	741,5	461,6	453,9	759,4	466,6	445,2	693,2	475,7	425,1
	1,6 : 1,0 : 1,0			1,7 : 1,0 : 1,0			1,6 : 1,1 : 1,0		

6.8.2. ANALIZA I OCENA BŁĘDÓW KSZTAŁTU PRZEDMIOTU OBRABIANEGO

Oceniane w pracy błędy kształtu przedmiotu obrabianego są wynikiem superpozycji odchyłek wymiarów spowodowanych drganiami i błędami geometrycznymi tokarki. Podstawowym parametrem, na podstawie którego oceniano te błędy, była maksymalna wysokość falistości W_r . Zestawienie parametrów falistości, które wyznaczono ze zmodyfikowanego profilu falistości (rys. 6.27), zebrano w tabeli 6.4. Odchyłki wymiaru wywołane błędami geometrycznymi i drganiami obrabiarki Δd^k wyznaczano z zależności (6.5), a ekwiwalentną całkowitą odchyłkę średnicy ΔD – z zależności (5.5). Globalny wskaźnik oceny błędów kształtu W_g^k przyjął wartość 6.16, co oznacza, że własności dynamiczne oraz błędy geometryczne analizowanej tokarki umożliwiają obróbkę przedmiotów w 7 klasie dokładności ISO, czyli spełniają stawiane jej wymagania związane z dokładnością obróbki. Ważne jest również, że lokalne wartości wskaźnika oceny W_{ij}^k nie przekroczyły wartości 7 we wszystkich reprezentatywnych podprzestrzeniach pola obróbki (por. tab. 6.5), co oznacza, że w całej przestrzeni roboczej odchyłki



Rys. 6.27. Zmodyfikowany profil falistości, rozkład amplitud nierówności i parametry falistości, wyznaczone na powierzchni obrobionej próbki E, w kierunku obwodowym, równoległym do śladów obróbki

Fig. 6.27. Modified profile of waviness, the bearing ratio and waviness parameters determined on the machined surface of test piece E in the circumferential direction parallel to feed ridges

Tabela 6.5. Maksymalna wysokość falistości W_t i odchyłki wymiarowe Δd^k przedmiotów obrabianych, spowodowane drganiami i błędami geometrycznymi tokarki, występujące po obróbce wykańczającej oraz lokalne wskaźniki oceny błędów kształtu W_{ij}^k wraz ze współczynnikami wag w_{ij}


Table 6.5. Maximum peak-to-valley height of the waviness W_t and dimensional deviations Δd^k of the test pieces resulting from the lathe's geometrical errors and its vibration occurring after finishing and the local evaluation indexes of the form errors W_{ij}^k with weight factors w_{ij}

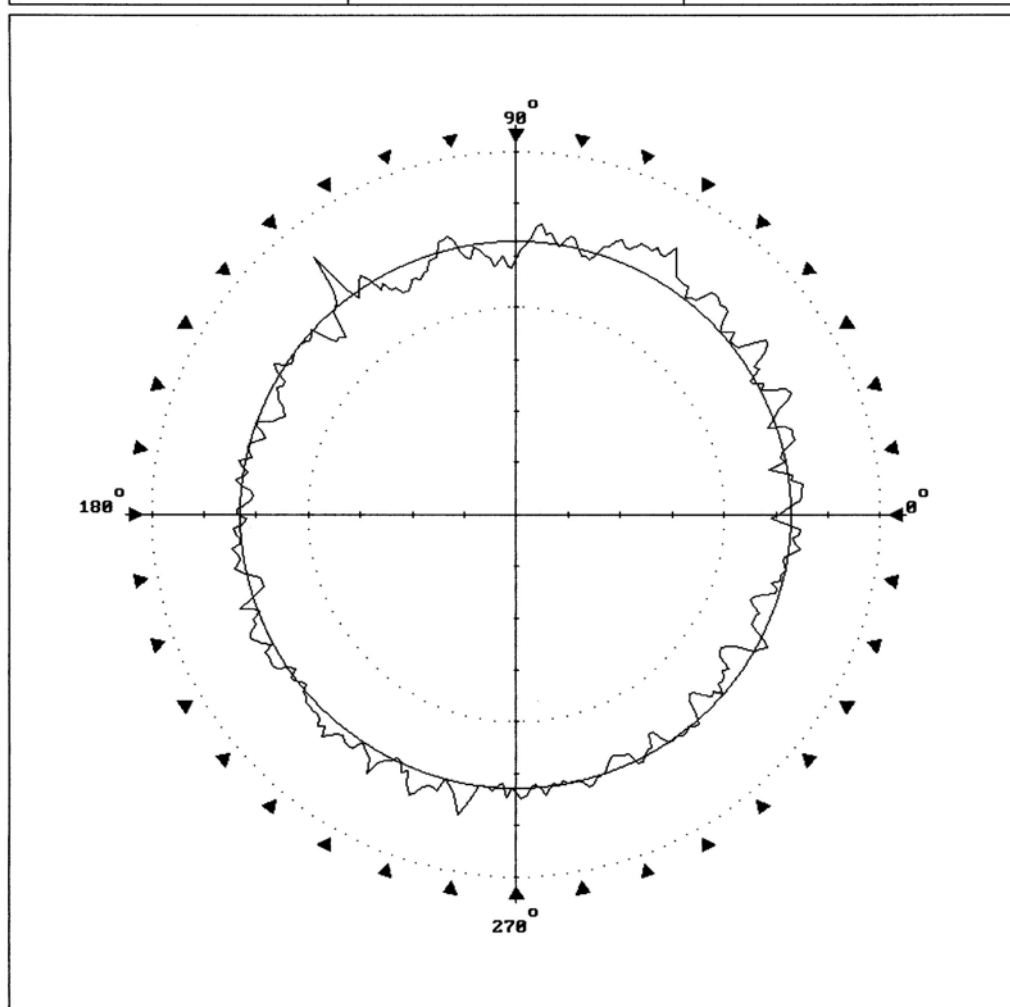
Zakres średnic toczenia (średnica rzeczywista) [mm]	Współczynnik wagi Wysokość falistości Odchyłka wymiaru Wskaźnik oceny	Zakres odległości od powierzchni czołowej szcęk uchwyty L_w [mm] (odległość rzeczywista)		
		0–40 (35)	40–80 (76)	80–120 (119)
Ø50–Ø80 ($D = 70$)	w_{ij}	0,25	0,23	0,06
	$W_t(\bar{x} \pm s)$	$3,92 \mu\text{m} \pm 1,44 \mu\text{m}$	$4,50 \mu\text{m} \pm 0,88 \mu\text{m}$	$2,39 \mu\text{m} \pm 0,17 \mu\text{m}$
	Δd^k	7,84 μm	9,0 μm	4,78 μm
	W_{ij}^k	5,97	6,27	4,89
Ø80–Ø120 ($D = 109$)	w_{ij}	0,23	0,08	0,05
	$W_t(\bar{x} \pm s)$	$6,06 \mu\text{m} \pm 1,77 \mu\text{m}$	$5,48 \mu\text{m} \pm 0,33 \mu\text{m}$	$6,4 \mu\text{m} \pm 2,16 \mu\text{m}$
	Δd^k	12,12 μm	10,96 μm	12,82 μm
	W_{ij}^k	6,58	6,36	6,70
Ø120–Ø180 ($D = 154$)	w_{ij}	0,10	0	0
	$W_t(\bar{x} \pm s)$	$4,66 \mu\text{m} \pm 0,77 \mu\text{m}$	—	—
	Δd^k	9,32 μm	—	—
	W_{ij}^k	5,75	—	—

wymiaru, wywołane błędami geometrycznymi i drganiami obrabiarki, nie będą większe od odchyłek dopuszczalnych związanych z 7 klasą dokładności ISO (por. tab. 4.2).

Odbiorczy wskaźnik oceny błędów kształtu W_o^k przyjął wartość 6,95 (maksymalna wysokość falistości $W_t = 6,67 \mu\text{m}$). Zgodnie z tym wskaźnikiem własności statyczne badanej tokarki umożliwiłyby obróbkę przedmiotów w 7 klasie dokładności ISO ($W_o^k \leq 7$), a więc w zakresie dokładności dopuszczalnych dla obróbki wykańczającej.

Do celów poglądowych błędy kształtu i złożone błędy kształtu i położenia przedmiotu próbnego, związane z profilem w przekroju prostopadłym do jego osi, oceniano również z użyciem innych parametrów. Należały do nich, oprócz wspomnianej maksymalnej wysokości falistości W_t , bicie promieniowe przedmiotu obrobionego i jego okrągłość. Bicie to oceniano mierząc odchyłkę bicia promieniowego całkowitego przedmiotu obrobionego zamocowanego w uchwycie tokarki ΔB_{tr}^{uch} i umieszczonego na stole okrągłościomierza ΔB_{tr}^{okr} . Odchyłki okrągłości ΔZ_q wyznaczano względem środka okręgu średniego, ale zastosowano dwa rodzaje filtrów. Dla odchyłek okrągłości ΔZ_q^{15} , odzwierciedlających wpływ błędów geometrycznych, stosowano filtr dolnoprzepustowy, przepuszczający od 2 do 15 fal nierówności przypadających na jeden obrót przedmiotu próbnego. Odchyłki ΔZ_q ujmowały wpływ drgań obrabiarki i wyznaczano je z profilu okrągłości po zastosowaniu filtra środkowoprzepustowego, przepuszczającego od 15 do 150 fal nierówności przypadających na jeden obrót przedmiotu próbnego. Przykładowy profil

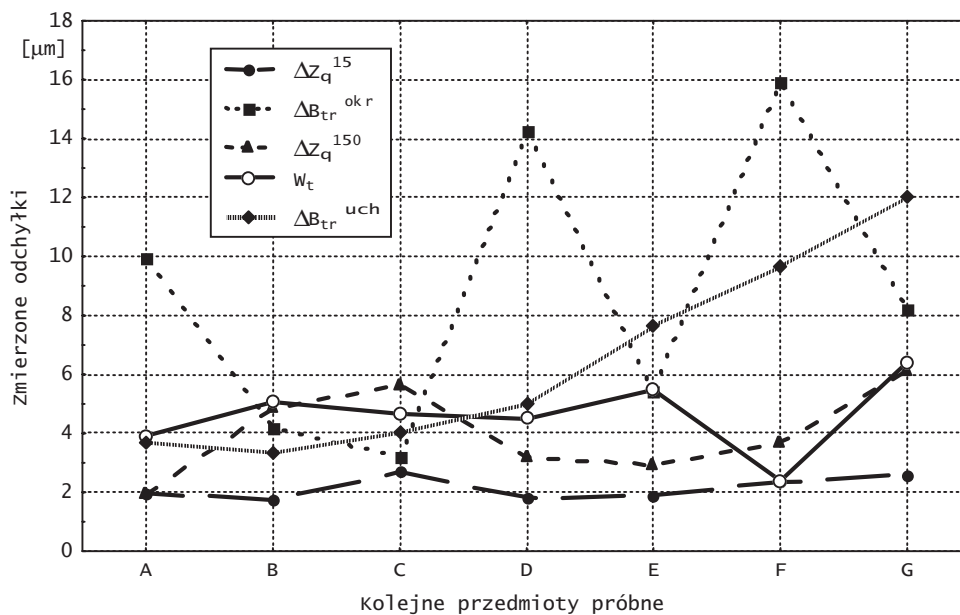
IHP TR265 Version 3.36		ITMiA Politechnika Uroclawska			
LS ROUNDNESS RESULTS			3.95 um	Meas mode	External
Feature name	UACEK	Scale	2.00 um	Meas. date	24-11-2000
Feature no.	04	Z height	46.5 mm	Meas. time	16:58:14
R	117.20 mm	Datum	SPINDLE		
○	3.20 um	Filter type	2CR		
E	0.40 um	Filter	1-50 upr		
∠	145.8 deg	Profile	100.0 %		



Rys. 6.28. Profil okrągłości obrabianej próbki C wraz z wyznaczonymi parametrami
 Fig. 6.28. Roundness profile of a machined test piece C with the parameters determined

okrągłości próbki zamieszczono na rysunku 6.28. Zestawienie odchyłek kształtu, zmierzonych na obwodzie przedmiotu obrabianego, przedstawiono na rysunku 6.29.

Podczas pomiarów obserwuje się znaczny rozrzut najważniejszych parametrów określających błędy kształtu powierzchni przedmiotu obrabianego (por. rys. 6.29). Analiza statystyczna dowodzi, że wyznaczone parametry nie są ze sobą w żadnym stopniu skorelowane, więc trudno jest wskazać jeden z nich jako reprezentatywny do stosowania w procedurze oceny. Spośród wszystkich parametrów, związanych z błędami kształtu, największą czułość na zmiany próbek wykazuje odchyłka bicia promieniowego całkowitego ΔB_{tr}^{okr} , wyznaczona na okrągłościomierzu. Jej zmiany dają się też logicznie uzasadnić, gdyż zwiększenie bicia jest obserwowane zarówno podczas zwiększania wysięgu, jak i średnicy przedmiotu obrabianego. Zwraca natomiast uwagę to, że parametr falistości zachowuje się na ogół odwrotnie. Duże wartości odchyłek ΔB_{tr}^{okr} , w porównaniu z odchyłkami okrągłości ΔZ_q , świadczą o nieprecyzyjnym ustawieniu przedmiotów na okrągłościomierzu. Pomiaru wykonywane na tym przyrządzie są bardzo wrażliwe na ustawienie osi przedmiotu obrabianego w osi stołu obrotowego i na wszelkie mikrozarzysowania na powierzchni, które mogą być powodowane nieostrożnym przenoszeniem tego przedmiotu z obrabiarki lub nieuważnym jego układaniem na hartowanych krawędziach rowków teowych stolika lub pryzmy innego przyrządu pomiarowego.



Rys. 6.29. Porównanie odchyłek kształtu i złożonych odchyłek kształtu i położenia, zmierzonych na powierzchni wszystkich przedmiotów próbnych (A–G), w kierunku obwodowym

Fig. 6.29. Comparison of deviations of form and composite deviations of form and position measured on the test piece surface of all test pieces (A–G) in the circumferential direction

Analiza odchyłek okrągłości dowodzi, że większe wartości przyjmuje odchyłka ΔZ_q^{150} . Może to świadczyć o tym, że w błędach zarysu okrągłości większy udział ma składowa związana z drganiami układu konstrukcyjnego, w porównaniu ze składową o małej częstotliwości, odzwierciedlającą wpływ błędów geometrycznych tokarki (głównie błędów ułożyskowania). Odchyłki okrągłości ΔZ_q^{150} i falistość W_t mają zbliżone wartości, natomiast odchyłki ΔZ_q^{15} na ogół są dwukrotnie mniejsze. Nie można ich bezpośrednio ze sobą porównywać ze względu na zastosowanie w ich pomiarach różnych końcówek pomiarowych – kulki o średnicy 2 mm na okrągłościomierzu lub końcówki stożkowej o promieniu wierzchołka 2 μm na profilografometrze. Mimo zalet okrągłościomierza, końcówka stożkowa wnika głębiej w bruzdy profilu nierówności niż kulka i daje lepsze odwzorowanie zarysu, ale też większe wskazania. W przypadku profilografometru trudniej jest natomiast przeprowadzić analizę harmoniczną fal nierówności na powierzchni przedmiotu obrabianego. Wynika to ze zbyt krótkiego odcinka pomiarowego, jaki można zrealizować na tym przyrządzie w przypadku próbek walcowych.

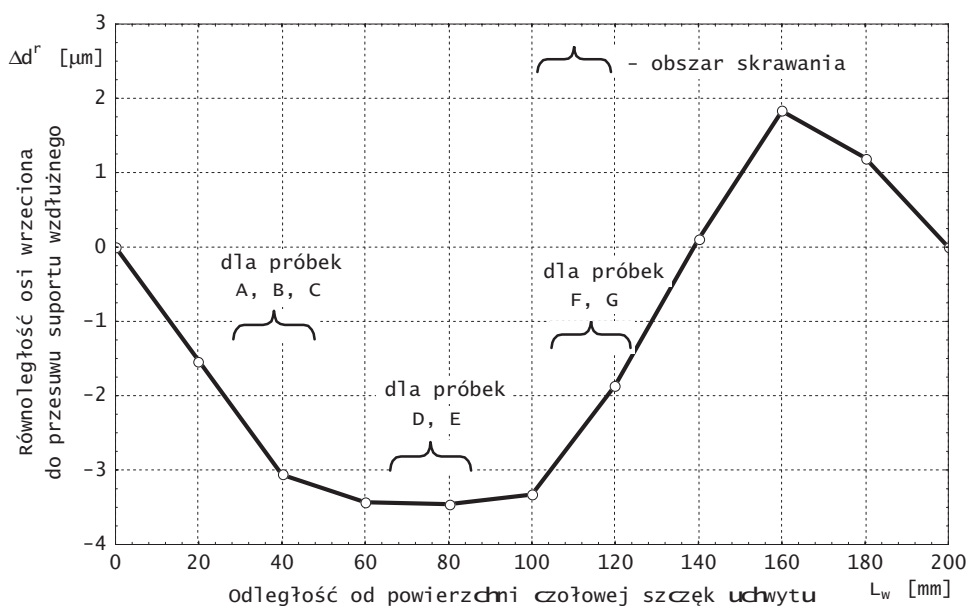
Wskaźnik oceny W_g^k , wyznaczony dla odchyłek okrągłości, daje zbyt optymistyczne wartości. Jeśli przyjąć założenie, że odchyłka wymiaru wywołana błędami geometrycznymi i drganiami obrabiarki Δd^k jest równa większej, spośród wyznaczanych, odchyłce okrągłości ΔZ_q^{150} , to wskaźnik ten przyjmie wartość 3,97. Podczas wyznaczania odchyłki kształtu Δd^k nie podwaja się wartości odchyłek okrągłości, gdyż charakteryzują one błędy kształtu całego profilu okrągłości. W odróżnieniu parametr falistości W_t opisuje tylko wycinek powierzchni, gdyż krótki jest odcinek pomiarowy. Dlatego falistość W_t odnoszona jest do dwóch stron powierzchni obrabianej, z jakimi ma się do czynienia podczas pomiaru średnicy próbki.

Podczas pomiaru falistości występują błędy pomiaru, które są powodowane niedokładnością ustawienia przedmiotu obrabianego. Jej skutkiem jest nierównoległość kierunku przesuwu głowicy pomiarowej w stosunku do linii śrubowej, wyznaczającej ślady po kolejnych przejściach narzędzia. Podczas pomiaru okrągłości toczzonej próbki nie jest możliwe takie ustawienie przedmiotu, aby końcówka pomiarowa nie przecinała, przynajmniej jeden raz, bruzdy po przejściu narzędzia. W obu przypadkach pomiar profilu jest więc obciążony nieuniknionymi błędami.

W celu sprawdzenia wpływu układu narzędziowego na uzyskiwaną dokładność obróbki dokonano, w płaszczyźnie poziomej, pomiaru równoległości osi wrzeczona do przesuwu suportu wzdłużnego. Zastosowano taką samą metodę pomiaru jak w teście G7 (według PN-M-55651 [201]), ale pomiaru dokonano na długości równej 200 mm. Wyznaczone odchyłki równoległości $\Delta d''$ odniesiono do linii reprezentatywnej, łączącej początkowy i końcowy punkt pomiarowy (rys. 6.30). Wartości tej odchyłki nie przekroczyły 4 μm na całej długości pomiarowej. Odchyłki $\Delta d''$ powinny być brane pod uwagę w ocenie błędów kształtu przedmiotu obrabianego, jeśli uwzględni się dokładność uzyskiwaną na tokarce w całej przestrzeni roboczej. Uwzględniają one wpływ niedokładności geometrycznej obrabiarki na błędy kształtu powstające w kierunku osiowym przedmiotu obrabianego, podczas gdy wcześniej omawiane odchyłki falistości, okrągłości lub bicia odnosiły się do błędów obróbki w kierunku promieniowym. Gdyby dla

każdej z zastosowanych próbek, do zmierzonych odchyłek wymiaru Δd^k , wywołanych błędami geometrycznymi i drganiami obrabiarki, dodać odchyłki równoległości Δd^r , wówczas globalny wskaźnik oceny błędów kształtu W_g^k wzrósłby z 6,16 do 6,65. Wskaźnik W_g^k wzrósłby więc o 0,49, czyli dodatkowo uwzględnione błędy równoległości pogorszyłyby dokładność uzyskiwaną na obrabiarce o „pół” umownej klasy dokładności ISO. Nie jest jednak pewne, czy wyznaczona nierównoległość przesuwu suportu wzdłużnego względem osi wrzeciona odzwierciedliłaby się na przedmiocie obrabianym podobnie, jak w pomiarach obrabiarki bez obciążenia procesem roboczym. Lepszym rozwiązaniem byłby więc pomiar odchyłki walcowości, która łączy w sobie składowe błędów kształtu, występujących na obwodzie i na tworzącej walcowego przedmiotu obrabianego.

Podobnie jak w przypadku pomiarów charakterystyk statycznych (por. rozdz. 6.8.1), należy przeprowadzić modyfikację metody pomiaru odchyłek kształtu, umożliwiając poprawne wyznaczenie odchyłki Δd^k . Zmiana tej metody zmusi jednak do rezygnacji z typowych narzędzi pomiarowych w postaci profilografometru lub okrągłościomierza, ale będzie możliwa do przeprowadzenia bezpośrednio na tokarce, jeśli zostanie wykorzystany jej napęd główny i posuw. Koniecznym wyposażeniem zestawu pomiarowego powinien być czujnik do pomiaru wysokości nierówności na powierzchni próbki oraz przetwornik do precyzyjnego ustalania kąтового położenia wrzeciona. Proponowane



Rys. 6.30. Odchyłka równoległości osi wrzeciona względem przesuwu suportu wzdłużnego w zależności od odległości miejsca pomiaru od powierzchni czołowej szczęk uchwytu

Fig. 6.30. Deviation of parallelism of the spindle axis relative to the feed of longitudinal carriage as dependent on the distance of the measuring point from the face surface of gripping jaws of the chuck

oprzyrządowanie pomiarowe umożliwi również wyznaczenie odchyłki walcowości, zwłaszcza że do jej wyznaczania można stosować, między innymi, metodę pomiaru zarysu względem linii śrubowej o odpowiednio dobranych parametrach [2]. W zmodyfikowanej metodzie pomiarowej konieczne jest uwzględnienie korekcji błędów ułożyskowania wrzeciona i błędów przesuwu suportów tokarki.

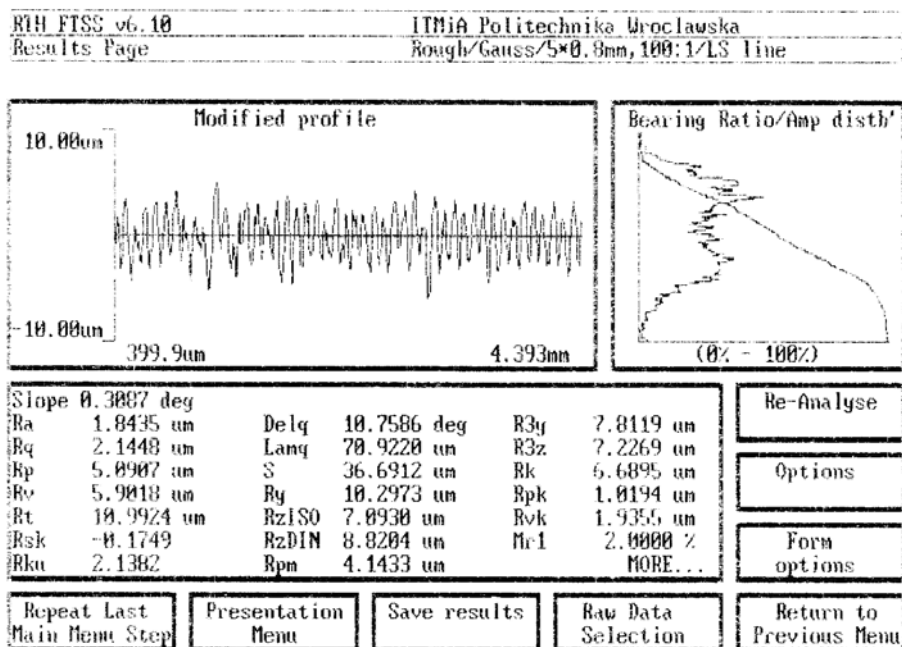
6.8.3. ANALIZA I OCENA CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI OBROBIONEJ

Chropowość powierzchni przedmiotu uzyskana w efekcie stabilnej obróbki w niewielkim stopniu zależy od własności układu konstrukcyjnego obrabiarki (por. rozdz. 4.1). Jest ona właściwością eksploatacyjną maszyny, ale uwarunkowaną przede wszystkim czynnikami obróbkowymi: geometrią narzędzia, stanem zużycia krawędzi skrawającej, parametrami obróbki, rodzajem cieczy obróbkowej, rodzajem materiału obrabianego. Przeprowadzenie analizy odchyłek chropowatości jest prostsze niż w przypadku odchyłek kształtu, gdyż istnieje praktycznie jedna, zdefiniowana metoda pomiarów. Problemem może być natomiast wybór jednego, z wielu zdefiniowanych, parametru chropowatości, który nadawałby się najlepiej do celów oceny topografii obrobionej powierzchni. Powinien on uwzględniać te parametry, które opisują specyficzne funkcje użytkowe powierzchni ocenianego przedmiotu. W przypadku oceny właściwości eksploatacyjnych obrabiarek wybrano za parametr reprezentatywny maksymalną wysokość chropowatości R_p , gdyż w stosunku do tego parametru zostały określone wartości liczbowe odchyłek dopuszczalnych (por. rozdz. 4.2), które ustalono na podstawie obszernych badań w różnych gałęziach przemysłu [61, 62, 105].

Zestawienie parametrów R_p , które wyznaczono ze zmodyfikowanego profilu chropowatości (przykładowy profil – rys. 6.31), przedstawiono w tabeli 6.6. Odchyłki wymiaru, związane z chropowatością powierzchni Δd^c wyznaczano z zależności (6.4), a ekwiwalentną całkowitą odchyłkę średnicy ΔD – z zależności (5.6). Globalny wskaźnik oceny chropowatości W_g^c przyjął wartość 7,33. Oznacza to, że zastosowane narzędzie i przyjęte warunki procesu skrawania umożliwiają obróbkę przedmiotów w 8 klasie dokładności ISO, czyli nie są spełnione stawiane tokarce wymagania, ze względu na chropowość powierzchni uzyskiwaną w warunkach obróbki wykańczającej. Wymagania te ($W_g^c \leq 7$) były spełnione tylko w dwóch spośród siedmiu analizowanych podprzestrzeni pola obróbki (por. tab. 6.6).

Odbiorczy wskaźnik oceny chropowatości W_o^c przyjął wartość 7,18 (maksymalna wysokość chropowatości $R_t = 6,46 \mu\text{m}$). Zgodnie z tym wskaźnikiem przyjęte narzędzie i parametry obróbki umożliwiałyby uzyskanie chropowatości powierzchni w 8 klasie dokładności ISO, to znaczy w zakresie dokładności niedopuszczalnych dla obróbki wykańczającej.

Pomiar parametrów chropowatości powierzchni obrobionej odbywał się na profilografometrze, a więc z użyciem najdokładniejszej metody pomiaru. Jeśli jednak wziąć pod uwagę propozycję modyfikacji metody wyznaczania odchyłek wymiaru spowodowanych odkształceniami statycznymi układu Δd^s i odchyłek wywołanych błędami geo-



Rys. 6.31. Zmodyfikowany profil chropowatości, rozkład amplitud nierówności i parametry chropowatości, wyznaczone na powierzchni obrabianej próbki E, w kierunku osiowym, prostopadłym do śladów obróbki

Fig. 6.31. Modified profile of roughness, the bearing ratio and roughness parameters determined on the machined surface of the test piece E in the axial direction perpendicular to the feed ridges

metrycznymi i drganiami obrabiarki Δd^k , to rozważyć też można pomiar chropowatości bez zdejmowania próbki z uchwytu. Metoda taka była już stosowana w pracy [53], w której profilometr został zamontowany na suporcie narzędziowym. Tego typu rozwiązanie może być zastosowane, jeśli w perspektywie będzie istniała potrzeba testowania chropowatości, uzyskiwanej różnymi narzędziami w różnych warunkach procesu skrawania. Przenośny profilometr jest poza tym znacznie tańszym urządzeniem, niż profesjonalny profilografometr.

6.8.4. GLOBALNA OCENA TOKARKI

Do globalnej oceny tokarki wykorzystano wskaźniki W_g i W_o , wyznaczone dla rzeczywistych, (a nie ekwiwalentnych, całkowitych odchyłek wymiarowych ΔD (por. zależność (5.3)). Zestawienie tych odchyłek wraz z lokalnymi wartościami wskaźnika oceny zebrano w tabeli 6.7. Globalny wskaźnik oceny W_g przyjął dla analizowanej tokarki wartość 6,65, a wskaźnik odbiorczy W_o – 6,94. W obu wypadkach można stwierdzić, że biorąc pod uwagę wszystkie składowe całkowitej odchyłki wymiarowej, które wystąpiły w wyniku obróbki wykańczającej przedmiotów próbnych, oceniana obrabiarka

Tabela 6.6. Maksymalna wysokość chropowatości R_t i odchyłki wymiarowe Δd^c przedmiotów obrabianych, związane z chropowatością powierzchni obrabianej, występującą po obróbce wykańczającej oraz lokalne wskaźniki oceny błędów kształtu W_{ij}^c wraz ze współczynnikami wag w_{ij}

Table 6.6. Maximum peak-to-valley height of the roughness profile R_t and dimensional deviations Δd^c of the test pieces due to surface roughness occurring after finishing and the local indexes of the roughness evaluation W_{ij}^c with weight factors w_{ij}

Zakres średnic toczenia (średnica rzeczywista) [mm]	Współczynnik wagi Wysokość chropow. Odchyłka wymiaru Wskaźnik oceny	Zakres odległości od powierzchni czołowej szczęk uchwyty L_w [mm] (odległość rzeczywista)		
		0–40 mm (35 mm)	40–80 mm (76 mm)	80–120mm (119 mm)
Ø50–Ø80 ($D = 70$)	w_{ij}	0,25	0,23	0,06
	$R_t(\bar{x} \pm s)$	5,93 $\mu\text{m} \pm 0,60 \mu\text{m}$	5,52 $\mu\text{m} \pm 0,43 \mu\text{m}$	3,67 $\mu\text{m} \pm 0,40 \mu\text{m}$
	Δd^c	11,86 μm	11,04 μm	7,34 μm
	W_{ij}^c	7,16	7,00	6,11
Ø80–Ø120 ($D = 109$)	w_{ij}	0,23	0,08	0,05
	$R_t(\bar{x} \pm s)$	8,20 $\mu\text{m} \pm 0,65 \mu\text{m}$	10,68 $\mu\text{m} \pm 0,50 \mu\text{m}$	10,7 $\mu\text{m} \pm 0,39 \mu\text{m}$
	Δd^c	16,40 μm	21,36 μm	21,42 μm
	W_{ij}^c	7,53	8,10	8,11
Ø120–Ø180 ($D = 154$)	w_{ij}	0,10	0	0
	$R_t(\bar{x} \pm s)$	10,59 $\mu\text{m} \pm 0,14 \mu\text{m}$	—	—
	Δd^c	21,18 μm	—	—
	W_{ij}^c	7,83	—	—

umożliwia wytwarzanie z dokładnością wymiarowo-kształtową mieszczącą się w 7 klasie dokładności ISO. Tak więc użyta do badań tokarka TUR 50 i zrealizowany proces skrawania spełniają wymagania dotyczące dokładności obróbki.

Z porównania cząstkowych wskaźników oceny W_g^s , W_g^k , W_g^c , W_o^s , W_o^k , W_o^c ze wskaźnikami oceny W_g i W_o (por. rozdz. 6.8.1–6.8.3) wynika, że chropowatość powierzchni przedmiotów próbnych wyraźnie obniża ocenę tokarki traktowanej łącznie z procesem skrawania. Wskaźniki W_g^c i W_o^c mogą służyć do oceny tego procesu, lecz nie zależą bezpośrednio od własności układu konstrukcyjnego tokarki. Ich włączenie do procedury oceny obrabiarki spowodowane było kompleksowością podejścia do funkcji realizowanych przez tę maszynę i chęcią ujęcia wszystkich najważniejszych czynników, wpływających na całkowitą odchyłkę wymiarową przedmiotu obrobionego. Wartości wskaźników W_g^c i W_o^c mogą ulec poprawie (zmniejszeniu), jeśli zmieni się narzędzie i parametry obróbki, ale oznaczałoby to odejście od przyjętych warunków przeprowadzania oceny (dla reprezentatywnych narzędzi i parametrów), które nie zawsze muszą być ze względu na uzyskiwaną dokładność obróbki najkorzystniejsze.

Do przeprowadzenia oceny wyłącznie układu konstrukcyjnego obrabiarki można zrezygnować z wyznaczania parametrów chropowatości i wprowadzić dodatkowe wskaźniki: globalny wskaźnik oceny układu konstrukcyjnego obrabiarki W_g^{OUPN} i odbior-

Tabela 6.7. Całkowite odchyłki wymiarowe ΔD , występujące po obróbce wykańczającej przedmiotów obrabianych oraz lokalne wskaźniki oceny W_{ij} wraz ze współczynnikami wag w_{ij}

Table 6.7. Total dimensional deviations ΔD occurring after finishing of the test pieces and the local indexes W_{ij} of the evaluation with weight factors w_{ij}

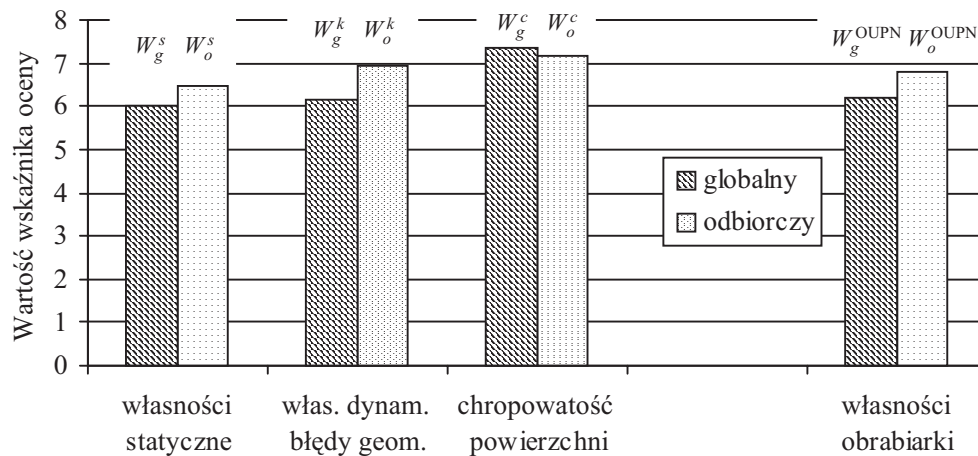
Zakres średnic toczenia (średnica rzeczywista)	Współczynnik wagi Odchyłka wymiaru Wskaźnik oceny	Zakres odległości od powierzchni czołowej szczęk uchwyty L_w [mm]		
		0–40mm	40–80mm	80–120mm
Ø50–Ø80 mm ($D = 70$ mm)	w_{ij}	0,25	0,23	0,06
	ΔD	27,71 μm	25,71 μm	17,45 μm
	W_{ij}	6,72	6,56	5,72
Ø80–Ø120 mm ($D = 109$ mm)	w_{ij}	0,23	0,08	0,05
	ΔD	32,99 μm	34,07 μm	36,81 μm
	W_{ij}	6,77	6,84	7,01
Ø120–Ø180 mm ($D = 154$ mm)	w_{ij}	0,10	0	0
	ΔD	34,92 μm	—	—
	W_{ij}	6,63	—	—

czy wskaźnik oceny układu konstrukcyjnego obrabiarki W_o^{OUPN} , które zdefiniowane będą podobnie, jak w rozdziale 5.2, ale odnosić się będą do łącznej oceny wpływu na odchyłki wymiarowe przedmiotu obrabianego, własności statycznych i dynamicznych układu konstrukcyjnego oraz dokładności geometrycznej obrabiarki. Wskaźniki te wyznaczane będą z zależności (5.1), przy czym ekwiwalentna całkowita odchyłka wymiarowa ΔD przyjmie postać

$$\Delta D = \frac{\Delta d^s + \Delta d^k}{0,65} = 1,54(\Delta d^s + \Delta d^k) \quad (6.6)$$

Liczba 0,65 w mianowniku tego wyrażenia wynika z przyjęcia udziałów dopuszczalnych odchyłek kształtu w wysokości 40%, a dopuszczalnych odchyłek związanych z odkształceniami statycznymi – 25% całkowitej odchyłki wymiaru (por. rozdz. 4.2).

Globalny wskaźnik oceny układu konstrukcyjnego obrabiarki W_g^{OUPN} przyjął wartość 6,18, a wskaźnik odbiorczy W_o^{OUPN} – 6,79. W obu przypadkach wskaźniki przyjęły mniejsze wartości niż wskaźniki W_g i W_o , co oznacza, że własności konstrukcji tokarki, rozpatrywane bez wpływu procesu skrawania umożliwiają uzyskanie większej dokładności wymiarowo-kształtowej przedmiotów obrobionych. Uwzględnienie w procedurze oceny obrabiarki procesu skrawania, z zastosowanymi w tej pracy parametrami toczenia i geometrią narzędzia, powoduje pogorszenie wskaźników oceny. Podkreślić należy, że wpływ tego procesu nie jest jednak na tyle duży, aby zmienić osiąganą na testowanej tokarce klasę dokładności obróbki. Całkowite odchyłki wymiarów próbnych przedmiotów próbnych i tak mieściły się w 7 klasie dokładności ISO, czyli tokar-



Rys. 6.32. Porównanie wyznaczonych wskaźników oceny własności tokarki

Fig. 6.32. Comparison of the determined indexes of the lathe's properties evaluation

ka TUR 50 spełniała stawiane jej wymagania dotyczące dokładności obróbki wykańczającej.

6.9. OKREŚLENIE PRZYDATNOŚCI ZAPROPONOWANEJ METODY BADAŃ DO OCENY WŁASNOŚCI OBRABIAREK

Wyniki badań potwierdziły, że przedstawiona w pracy kompleksowa metoda oceny własności i walorów eksploatacyjnych obrabiarek stwarza możliwość przeprowadzenia analizy zarówno wpływu własności układu konstrukcyjnego obrabiarki, jak i warunków procesu obróbki na dokładność wymiarowo-kształtową obrabianych przedmiotów. Wprowadzone wskaźniki mają charakter uniwersalny. Można je stosować nie tylko do globalnej oceny obrabiarki zarówno w toku jej badań odbiorczych, jak i prototypu, lecz także do przeprowadzania ocen cząstkowych wybranych własności obrabiarki w dowolnym miejscu przestrzeni roboczej. Wyrażane są czytelnie, w sposób ilościowy, w postaci liczb odpowiadających klasom dokładności wymiarowej, które zarazem są wartościami odniesienia w przypadku konkretnych rodzajów obróbki. Osiągane przez badane obrabiarki wartości wskaźników oceny umożliwiają porównywanie ich różnych konstrukcji lub układów tego samego typu.

Wprowadzona metoda oceny uwzględnia wpływ własności masowo-dysypatywno-sprężystych obrabiarki, przedmiotu obrabianego i narzędzia oraz właściwości procesu skrawania na osiąganą dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotu obrabianego. Własności statyczne i dynamiczne maszyny są traktowane sumarycznie jako superpozycja własności wszystkich składników układu OUPN z uwzględnieniem wzajemnych sprzężeń zespołów oraz sprzężenia układu przedmiotowego i narzędziowego poprzez

proces skrawania. Uwzględnienie tych składników w procedurze oceny stanowi zaletę tej metody w porównaniu z metodami obliczeniowymi. Szczególnie modele dynamiczne wyznaczone na podstawie danych literaturowych mogą być w znacznym stopniu niepewne, powodując duże błędy obliczeń [144]. Konieczność doświadczalnej weryfikacji [144] tego typu modeli obliczeniowych wynika z zastosowanych uproszczeń i wymaga dysponowania fizycznie istniejącą obrabiarką, podobnie jak w przypadku wprowadzonej metody oceny.

Negatywny wynik oceny własności obrabiarki wymaga podjęcia działań zmierzających do poprawy konstrukcji. Metoda oceny nie daje konkretnej odpowiedzi, który zespół maszyny będzie należało przekonstruować, ale przydatne może być wskazanie (za pomocą wprowadzonych wskaźników), że poprawa ma dotyczyć własności statycznych lub dynamicznych z geometrycznymi. Znalezienie słabego ogniwa układu OUPN jest możliwe na drodze doświadczalnej lub obliczeniowej (nie dotyczy to poszukiwania nadmiernych błędów geometrycznych). W przypadku metod obliczeniowych konieczne jest jednak dysponowanie zweryfikowanym eksperymentalnie modelem, którego budowa wymaga dużego doświadczenia. Metody eksperymentalne są z kolei znacznie prostsze, ale wykorzystywane środki badawcze wymagają dużych nakładów finansowych.

Przedstawiona metoda oceny własności tokarki jest realizowana w warunkach ruchomych, z zastosowaniem rzeczywistych obciążeń roboczych. Nie wymaga ona znajomości konkretnych wartości składowych siły skrawania, bo są one pochodną zastosowanego narzędzia i materiału oraz przyjętych parametrów skrawania. Rozkład obciążeń w całej przestrzeni roboczej maszyny, związany ze zmianami konfiguracji jej struktury, jest zapewniony również w sposób naturalny. Aby zapewnić odpowiadające temu rozkładowi reprezentatywne wzajemne położenia zespołów obrabiarki ustalone zostały próbki o ściśle dobranych reprezentatywnych gabarytach. Próbki te umożliwiają realizację skrawania w takich obszarach pola obróbki, w których największa jest częstość występowania obciążeń roboczych, stosownie do przyjętych zadań technologicznych. Dodatkowo przeprowadzone pomiary składowych siły skrawania, dostarczyły konkretnych wartości tych sił, jakie należy przyjmować w obliczeniowej metodzie oceny własności statycznych, z zastosowaniem proponowanego w tej pracy modelu oceny.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem monografii było opracowanie metody kompleksowej oceny własności układów konstrukcyjnych obrabiarek i ich walorów eksploatacyjnych na podstawie badań efektów obróbki przedmiotów próbnych i z uwzględnieniem stawianych maszynie zadań technologicznych. Argumentów potwierdzających zasadność przyjętego celu dostarcza zamieszczony w pracy przegląd różnych metod badań obrabiarek, stosowanych w praktyce przemysłowej i laboratoryjnej. Na jego podstawie można stwierdzić, że obecnie brak jest efektywnych metod, umożliwiających jednoznaczną ocenę własności układu konstrukcyjnego obrabiarki. Wynika to z braku odpowiednich kryteriów oceny i konkretnych wartości odniesienia oraz z niepełnej wiedzy na temat związków między własnościami obrabiarki a jej podstawowymi funkcjami użytkowymi. Ocena parametrów obrabiarek jest najczęściej przeprowadzana na podstawie przyjętych a priori, przez konstruktora lub użytkownika, wskaźników lub parametrów odniesienia. Nie istnieją też niezależne od producenta lub użytkownika metody oceny obrabiarek, uwzględniające zakres zastosowań tych maszyn, czy też stawiane im zadania technologiczne.

Podstawą nowego podejścia do zagadnienia oceny własności obrabiarek i ich walorów eksploatacyjnych jest uwzględnienie rzeczywistych obciążeń roboczych oraz poziomu dokładności wymiarowo-kształtowej i jakości powierzchni obrabianej przedmiotów. Przedstawiona metoda kompleksowej oceny zakłada takie obciążanie obrabiarki, jakie występuje podczas realizacji stabilnego procesu obróbki wykańczającej. Stany obciążenia i odpowiadające im różne położenia zespołów roboczych zależą od stawianych maszynie zadań obróbkowych. Dokładność obróbki jest oceniana przez pomiar i analizę odchyłek wymiarów próbnych przedmiotów obrabianych.

Wprowadzone zostały wskaźniki oceny obrabiarek, które uwzględniają związek między ocenianymi własnościami ich układu konstrukcyjnego i ich walorami eksploatacyjnymi a dokładnością obróbki przedmiotu próbnego. Pojęcie własności układu konstrukcyjnego obrabiarki ograniczone zostało w całej pracy do odkształcalności tego układu, której charakter zależy od rodzaju działających na maszynę obciążeń. Odzwierciedleniem własności statycznych są odkształcenia układu konstrukcyjnego pod wpływem stałych sił uogólnionych nie zmieniających się w czasie, pochodzących z procesu skrawania, napędu i ciężaru własnego elementów. Własności dynamiczne znajdują swój wyraz w odkształcalności układu w wyniku zmieniających się w czasie sił uogólnionych, pochodzących od procesu skrawania i napędu oraz związanych z bezwładnością

przemieszczających się lub obracających się zespołów. Własności cieplne natomiast należy wiązać z odkształceniami elementów układu konstrukcyjnego spowodowanymi źródłami ciepła występującymi wewnątrz maszyny, pochodzącymi od procesu skrawania i od otoczenia. Za miarodajne z punktu widzenia oceny poszczególnych własności przyjęto w pracy względne przemieszczenia między narzędziem a przedmiotem obrabianym wywołane odpowiednimi odkształceniami. Przemieszczenia te mają bezpośredni wpływ na dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotu obrobionego. Skutkiem odkształceń statycznych i cieplnych są odchyłki wymiarowe przedmiotu, a odkształcenia dynamiczne, którym towarzyszą drgania układu konstrukcyjnego, znajdują odzwierciedlenie na powierzchni przedmiotu obrobionego w postaci falistości.

W pracy stosuje się również pojęcie „własności geometryczne obrabiarki”, które jest utożsamiane z jej dokładnością geometryczną. Jest ona ściśle zależna od niedokładności geometrycznych i kinematycznych zespołów ruchowych. Ma ona wpływ na błędy kształtu i położenia przedmiotu, które odzwierciedlają się falistością powierzchni obrobionej o dłuższej fali niż w przypadku drgań układu konstrukcyjnego. Ze względu na podobny charakter skutków oddziaływania obrabiarki na dokładność kształtową przedmiotu obrobionego w postaci falistości, które są związane z własnościami geometrycznymi i dynamicznymi, obie te własności są traktowane w pracy łącznie. Przez stosowane w pracy pojęcie własności obrabiarki rozumiane jest łączne traktowanie własności statycznych, dynamicznych i geometrycznych maszyny. Skutkiem oddziaływań obrabiarki związanych z tymi własnościami są niedokładności wymiarowe i kształtowe przedmiotu obrobionego. Pojęcie własności obrabiarki i walory eksploatacyjne uwzględnia dodatkowo proces skrawania, którego warunki wpływają przede wszystkim na chropowatość powierzchni przedmiotu obrobionego. Jedynie w tym przypadku ocena uwzględnia wszystkie składowe całkowitej odchyłki wymiaru przedmiotu obrobionego, na którą składają się odchyłki geometryczne, odchyłki kształtu i położenia oraz chropowatość jego powierzchni.

W ocenie własności nie stosuje się bezpośredniego ich miernika, lecz ocenia się skutki odkształceń wyrażone odchyłkami wymiarowymi i błędami kształtu. Podejście takie umożliwia stosowanie w ocenie każdej z wcześniej wymienionych własności takiego samego miernika w postaci wskaźników wyrażających liczbowo klasę dokładności wymiarowej ISO. W wypadku zastosowania do oceny charakterystyk statycznych lub dynamicznych miernikiem ich mogłyby być co prawda wielkości fizyczne wyrażone odpowiednio względnymi przemieszczeniami lub amplitudą względnych przemieszczeń między przedmiotem a narzędziem, ale na ich podstawie nie można by było wnioskować o tym, czy obrabiarka jest dobra czy zła, ponieważ brak jest jednoznaczności wpływu tych przemieszczeń lub drgań na dokładność wymiarową ISO. Względne przemieszczenia o tej samej wartości mają różny wpływ na klasę dokładności ISO w zależności od wartości nominalnej wymiaru. Tego typu „fizyczne” mierniki oceny nie nadają się również do porównań obrabiarek, bo z faktu, że względne przemieszczenia między przedmiotem a narzędziem będą dla jednej maszyny w określonym punkcie przestrzeni roboczej mniejsze niż dla drugiej nie wynika wcale, że będzie ona dokładniej wy-

twarzała detale w całej przestrzeni roboczej, po uwzględnieniu przedmiotów obejmujących całe spektrum zadań obróbkowych.

Wprowadzone wskaźniki oceny umożliwiają nie tylko dokonanie całościowej oceny wpływu własności obrabiarki na uzyskaną klasę dokładności wymiarowo–kształtowej tego przedmiotu i jakość jego powierzchni, lecz także przeprowadzenie oceny cząstkowej wpływu własności statycznych, dynamicznych i geometrycznych tej obrabiarki lub procesu skrawania na wspomnianą klasę. Stwarzają również możliwość przeprowadzenia oceny układu konstrukcyjnego obrabiarki, bez uwzględniania wpływu czynników związanych z realizowanym procesem skrawania. Wskaźniki te wiążą w czytelny sposób własności obrabiarki z dokładnością obróbki wyrażoną w postaci odchyłek wymiarów, odchyłek kształtu i chropowatości powierzchni obrobionego przedmiotu. Wyrażane są one ilościowo i odpowiadają liczbom ciągłego rozkładu klas dokładności wymiarów ISO. Dla wprowadzonych wskaźników istnieją czytelne wartości odniesienia w postaci liczbowych wartości klas dokładności ISO, odpowiadających konkretnemu rodzajowi obróbki. Wskaźniki oceny umożliwiają porównywanie różnych wariantów konstrukcji obrabiarek lub układów tego samego typu. Na każdym etapie oceny własności obrabiarek istnieje również możliwość przeprowadzenia oceny cząstkowej z użyciem bezwzględnych wartości określonego rodzaju odchyłek dopuszczalnych i porównania zmierzonych odchyłek z podanymi w pracy wartościami odniesienia (tabele 4.1, 4.2 i 4.4).

Postać wskaźników zależy od ogólnego celu oceny własności obrabiarek, gdyż zdefiniowane są w odniesieniu do badań prototypu i do testów odbiorczych. Globalne i lokalne wskaźniki oceny, zalecane do stosowania w badaniach prototypu, umożliwiają dokonanie oceny obrabiarki na podstawie dokładności obróbki przedmiotu obrabianego, uzyskiwanej w różnych obszarach przestrzeni roboczej i na wykrycie, w których z nich obrabiarka nie spełnia wymagań dotyczących tej dokładności. Znajomość tych obszarów może być przydatna przy podejmowaniu badań prowadzących do wykrycia słabych ogniw konstrukcji, gdyż mogą one być prowadzone dla ściśle określonych konfiguracji struktury układu konstrukcyjnego, niekorzystnych ze względu na uzyskiwaną dokładność obróbki. Sama procedura oceny nie umożliwia bezpośrednio formułowania wniosków dotyczących wprowadzenia konkretnych zmian konstrukcyjnych, ale wskazuje ewentualnie, że są one konieczne. Definicja odbiorczych wskaźników oceny umożliwia uproszczenie procedury przeprowadzania badań, a ich wartości są zbliżone do wartości wskaźników globalnych. Wprowadzone wskaźniki umożliwiają sformułowanie praktycznych wniosków odnoszących się do poprawności układu konstrukcyjnego obrabiarki ze względu na wymaganą dokładność kształtowania przedmiotów.

W pracy sformułowana została ogólna procedura wyznaczania tych wskaźników, która na podstawie analizy konstrukcji i stawianych obrabiarce zadań obróbkowych, podaje sposób postępowania prowadzący do wyznaczenia rozkładu obciążeń w przestrzeni roboczej i do doboru reprezentatywnych przedmiotów, narzędzi, parametrów skrawania i oprzyrządowania. Określony też został sposób przeprowadzenia prób obróbkowych i pomiaru odchyłek wymiarowych przedmiotu obrabianego. Ze względu na róż-

nice w strukturach geometryczno–ruchowych różnych typów obrabiarek, procedura ta wymaga dla nich obiektowo zorientowanego uszczegółowienia.

Strategia rozwoju obrabiarek przewiduje konstruowanie maszyn tylko o takich możliwościach funkcjonalnych, które są wymagane przez użytkownika, czyli projektowania tzw. „obrabiarek ze znaną dokładnością” [35]. Wymaga to jednak dysponowania efektywnymi narzędziami obliczeniowymi do modelowania i wyznaczania odchyłek wymiarowych wynikających z odkształceń układu konstrukcyjnego obrabiarki, jej niedokładności geometrycznej i kinematycznej oraz warunków realizowanego procesu skrawania. Opracowana metoda oraz wskaźniki i kryteria oceny stwarzają możliwość włączenia ich do procedur projektowania i optymalizacji układów konstrukcyjnych obrabiarek i elastycznych systemów wytwórczych. Znajomość zadań obróbkowych jest niezbędna do ustalenia reprezentatywnego rozkładu obciążeń maszyny. Jest też ona podstawą do opracowania założeń konstrukcyjnych, kształtowania rozwiązania obrabiarki i do planowania testów roboczych. Wprowadzona metoda oceny może być przydatna w procesie konstruowania obrabiarek. Istniejące dotychczas metody oceny umożliwiały tylko dokonywanie porównawczej oceny charakterystyk obrabiarek, lecz nie stwarzały możliwości oceny ich konstrukcji.

Zaletą wykorzystywania wspólnych danych wyjściowych i metody oceny obrabiarki zarówno w projektowaniu, jak i w badaniach prototypu lub testach odbiorczych będzie możliwość porównania wyników uzyskanych w tych samych warunkach obciążenia układu oraz łatwej weryfikacji modelu obliczeniowego. Za pomocą zweryfikowanych modeli obliczeniowych dużo łatwiej, niż w przypadku badań, można dokonywać modyfikacji układu i znaleźć lepsze rozwiązanie konstrukcyjne.

Weryfikację metody oceny przeprowadzono na tokarce uniwersalnej średniej wielkości. Wyniki badań potwierdziły, że metoda ta stwarza możliwość analizy wpływu zarówno własności układu konstrukcyjnego obrabiarki, jak i warunków procesu obróbki na dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotów. Wprowadzone wskaźniki wykazywały wrażliwość na zmiany konfiguracji układu nośnego obrabiarki. Badania odchyłek wymiarowych, odchyłek kształtu i chropowatości przedmiotów próbnych przeprowadzone według opracowanej procedury oceny wykazały, że całkowite odchyłki wymiarów tych przedmiotów mieściły się w 7 klasie dokładności ISO, czyli tokarka TUR 50 spełniała stawiane tego typu maszynom wymagania dotyczące dokładności obróbki wykańczającej. Pomiary składowych siły skrawania dostarczyły konkretnych wartości tych sił, jakie należy przyjmować w obliczeniowej metodzie oceny własności statycznych, z zastosowaniem proponowanego w tej pracy modelu oceny.

W podsumowaniu można sformułować następujące wnioski:

1. Zaproponowana oryginalna metoda oceny własności i walorów eksploatacyjnych obrabiarek wprowadza czytelne, ilościowe wskaźniki oceny, które wiążą się z uzyskiwaną dokładnością wymiarowo-kształtową przedmiotów obrobionych i wyrażane są liczbami bezwymiarowymi związanymi z klasami dokładności ISO. Metoda ta daje konstruktorowi i użytkownikowi narzędzie umożliwiające dokonywanie obiektywnej oceny cech konstrukcyjnych i funkcjonalnych obrabiarki.

2. Metoda kompleksowej oceny stwarza możliwość analizy zarówno wpływu własności układu konstrukcyjnego obrabiarki, jak i wpływu warunków procesu obróbki na dokładność wykonania przedmiotów, gdyż wykazuje dużą czułość na zmiany parametrów konstrukcyjnych i technologicznych procesu.

3. Metoda oceny uwzględnia rzeczywiste obciążenia robocze maszyny, które są określane na podstawie analizy stawianych obrabiarce zadań obróbkowych oraz poziom dokładności wymiarowo-kształtowej i jakości powierzchni obrobionej przedmiotów. Ocena własności i walorów eksploatacyjnych obrabiarki jest realizowana za pomocą wskaźników, które uwzględniają odchyłki wymiarowe i kształtowe oraz chropowatość obrobionych powierzchni.

4. Wprowadzone wskaźniki oceny mają charakter uniwersalny. Można je wykorzystać nie tylko do globalnej oceny obrabiarki zarówno w toku testów odbiorczych, jak i badań prototypu, lecz także do oceny cząstkowej wybranych własności obrabiarki w różnych obszarach przestrzeni roboczej. Wskaźniki te można odnieść do wartości określających klasę dokładności ISO. Wartości zmierzonych odchyłek można porównać z bezwzględnymi wartościami, podanych w pracy, odchyłek dopuszczalnych.

5. Zaproponowane wskaźniki i kryteria oceny nadają się do włączenia do komputerowo wspartych procedur projektowania i optymalizacji układów konstrukcyjnych obrabiarek. Metoda oceny jest spójna z tymi procedurami, ponieważ umożliwia wykorzystanie wspólnych danych wejściowych oraz uwzględnienie takich samych reprezentatywnych stanów konfiguracji struktury i stanów obciążeń układu zarówno w toku konstruowania, jak i badań eksperymentalnych obrabiarki.

6. Bazy przedmiotów obrabianych są integralnym elementem procedur oceny obrabiarek, gdyż określane na ich podstawie zadania obróbkowe stanowią dane wejściowe zarówno w procesie konstruowania, jak i w badaniach prototypu i testach odbiorczych.

7. Weryfikacja eksperymentalna metody oceny, przeprowadzona na przykładzie tokarki uniwersalnej, wykazała praktyczną przydatność tej metody i stanowi jej konkretną aplikację w odniesieniu do oceny własności tej grupy maszyn technologicznych.

8. Doświadczenia osiągnięte podczas realizacji tej pracy umożliwią ukierunkowanie prac zmierzających do wprowadzenia, niezależnych od producenta i użytkownika, wytycznych dotyczących badań prototypu. Stwarzają również podstawy teoretyczne do unormowania badań odbiorczych obrabiarek w zakresie oceny uzyskiwanej dokładności wymiarowo-kształtowej przedmiotów próbných.

W toku badań stwierdzono, że metody zastosowane do pomiaru odchyłek wymiarów przedmiotu obrobionego na wybranej obrabiarce, powinny zostać zmodyfikowane, zwłaszcza że pomiar profilu okrągłości obarczony był nieuniknionymi błędami. Główny kierunek proponowanych zmian prowadzi do opracowania metod pomiaru, umożliwiających rejestrację zarysu linii śrubowej i wyznaczanie odchyłek wymiarowych na przedmiocie zamocowanym bezpośrednio na obrabiarce. Pomiaru powinny być przeprowadzone z wykorzystaniem napędu głównego i posuwu tokarki. Przeprowadzanie pomiarów bezpośrednio na obrabiarce pozwoli na uniknięcie błędów związanych z przenoszeniem przedmiotu i jego ustawianiem na przyrządach pomiarowych. W przypad-

ku odchyłek związanych z własnościami statycznymi obrabiarki powinny zostać wyznaczone uśrednione zmiany średnicy toczenia, które zachodzą pod wpływem skokowego zwiększania głębokości skrawania. W procedurze oceny błędów kształtu uwzględnić należy odchyłkę walcowości zamiast wysokości falistości. Odchyłka ta łączy w sobie składowe błędów kształtu, występujących zarówno na obwodzie, jak i na tworzącej walcowego przedmiotu obrabianego.

W zmodyfikowanej metodzie pomiarowej konieczne jest, podczas pomiaru niektórych odchyłek, wprowadzenie korekcji błędów ułożyskowania wrzeciona i błędów przesuwu suportów tokarki. Wcześniejszy pomiar odchyłek geometrycznych obrabiarki względem elementu wzorcowego (np. trzpienia kontrolnego lub kulki) umożliwiłby nie tylko dokonywanie wspomnianej korekcji, lecz także wydzielenie z odchyłki kształtu przedmiotu obrabianego Δd^k odchyłek związanych z własnościami dynamicznymi obrabiarki. Byłby to pierwszy krok do wydzielenia tych własności w procedurze oceny tej maszyny. Główną przeszkodą dokonania cząstkowych ocen błędów geometrycznych lub własności dynamicznych obrabiarki jest brak, w dostępnej literaturze, danych dotyczących udziału odchyłek, związanych z tymi czynnikami, w całkowitej odchyłce wymiarowej.

Prezentowana praca wskazuje na następujące kierunki dalszych badań:

- Opracowanie metody analizy zadań obróbkowych na podstawie danych z programów obróbkowych NC i wyznaczanie na ich podstawie rozkładów obciążeń występujących w przestrzeni roboczej różnych obrabiarek oraz ustalenie reprezentatywnych sposobów obróbki, sposobów mocowania i rodzajów narzędzi (obecnie brak jest podstawowych metod i opartych na technice CAD narzędzi, służących do analizy i zapisu zadań obróbkowych [21]).

- Opracowanie metody badań własności różnych odmian obrabiarek NC wraz z procedurami automatyzacji pomiaru i oceny (wykorzystać można gotowe układy pomiarowe wraz z układami sterowania, zamontowane standardowo na tych obrabiarkach, a wykonanie przedmiotów i ich obróbka na potrzeby procedury oceny są proste i powtarzalne).

- Rozwój systemów umożliwiających wybór obrabiarek, narzędzi i procesów na podstawie danych o wymaganych tolerancjach wymiarów obrobionych przedmiotów (informacje te umieszczane są na rysunku konstrukcyjnym, lecz obecnie nie istnieje żaden znormalizowany system ani protokół przekazywania danych, który umożliwiłaby wymianę informacji technologicznych, jakie należy wziąć pod uwagę przy takim wyborze [149]).

- Przeprowadzenie szeroko zakrojonych badań statystycznych błędów kształtu przedmiotów obrabianych i wydzielenie z nich odchyłek falistości i odchyłek spowodowanych błędami geometrycznymi obrabiarki w celu określenia wartości dopuszczalnych tych odchyłek oraz ustalenia ich udziału w całkowitej odchyłce wymiarowej (brak znajomości tych udziałów jest podstawową przeszkodą w możliwości korzystania z zaprezentowanej metody w ocenie cząstkowej oddzielnie odchyłek wymiarowych wywo-

łanych własnościami dynamicznymi obrabiarki i odchyłek spowodowanych jej błędami geometrycznymi).

- Rozwój metod nadzorowania obrabiarek sterowanych numerycznie i sterowania jakością obrabianych powierzchni, które będą w pełni zintegrowane na poziomie sterowania (obecnie obserwowana jest tendencja do umieszczenia sterowania jakością bliżej procesu obróbki; celem tych działań jest zapewnienie pomiaru i kompensacji błędów przedmiotu obrabianego, w trakcie procesu, z użyciem sterowania adaptacyjnego obrabiarki, bez konieczności późniejszego kontrolowania jakości wykonania [121]).

- Budowa standardowego systemu pomiarowego, który nie tylko umożliwi wytwórcom obrabiarek szybkie i proste wyznaczenie parametrów błędów kształtu przedmiotu obrabianego (bezpośrednio na obrabiarence), lecz także będzie mógł być zastosowany przez użytkowników, w warunkach produkcyjnych, do nadzorowania lub okresowego sprawdzania dokładności obróbki (większość bezdotykowych przetworników pomiarowych pracuje na obrabiarence w warunkach skrawania bez stosowania cieczy obróbkowych, rzadkością są układy pracujące w obecności tych płynów [18]).

- Analiza wpływu różnych składowych elementów układu nośnego i napędowego obrabiarki na dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotów obrabianych (nie jest np. jasne, w jaki sposób ułożyskowanie, napęd lub układ mocowania przedmiotu oddziałują na składowe błędów wykonania tych przedmiotów).

LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., *Wpływ nieregularności zarysów okrągłości na dokładność oceny pomiarami odniesieniowymi*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 1997, 17, nr 2, 73–85.
- [2] ADAMCZAK S., JANECKI D., *Skomputeryzowane pomiary zarysów kształtu powierzchni walcowych*. PAK, 1998, nr 1, 8–12.
- [3] ADAMCZAK S., JANECKI D., DOMAGALSKI R., *Eksperymentalna istotność wyznaczania harmonicznych zarysów okrągłości i falistości powierzchni*. W: VIII Konf. Nauk.–Techn. Metrologia w technikach wytwarzania maszyn Szczecin’99, T.1, Wyd. Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1999, 195–202.
- [4] AHLBORN D., *Meß- und Parameterfehler bei der Modalanalyse von Maschinen*, Fortschritt–Berichte VDI Reihe 11: Schwingungstechnik Nr. 163, VDI–Verlag, Düsseldorf 1992.
- [5] AHN T.Y., EMAN K.F., WU S.M., *Cutting Dynamics Identification by Dynamic Data System (DDS) Modeling Approach*, Journal of Engineering for Industry, Trans. of the ASME, 107, May 1985, 91–94.
- [6] ALTINTAS Y., CHAN P.K., *In-Process Detection and Suppression of Chatter in Milling*, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1992, 32, No.3, 329–347.
- [7] ATHANASIOU-GRIVAS D., HAAR M.E., *A Reliability Approach to the Design of Soil Slopes*. Design Parameters in Geotechnical Engineering, BGS, London, 1979, 1, 95–99.
- [8] ATTIA M.H., FRASER S., OSMAN M.O.M., *On-Line Estimation of Time-Variant Thermal Load Applied to Machine Tool Structures using a S-domain Inverse Solution*. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39, 985–1000.
- [9] AZOUZI R., GUILLOT M., *On-Line Prediction of Surface Finish and Dimensional Deviations in Turning using Neural Network Based Sensor Fusion*. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37, No. 9, 1201–1217.
- [10] BIAŁEK M., *Wymagania stawiane współczesnym obrabiarkom skrawającym*. Przegląd Mechaniczny, 1997, nr 11–12, 31–33.
- [11] BORYCZKO A., *Symulowanie nierówności powierzchni toczonych, modulowanych oddziaływaniami układu posuwu narzędzia w celu ich rozpoznawania*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1997, 21, Nr 4, 5–21.
- [12] BORYCZKO A., *The Influence of Relative Displacement of the Tool to the Workpiece on Forming the Roughness of Surface Turned*. Advances in Manufacturing Science and Technology, 2000, 24, No. 2, 95–105.
- [13] BORYCZKO A., *Układ do bezstykowego pomiaru okrągłości powierzchni walcowych i możliwości jego zastosowania*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 1997, 17, nr 2, 87–95.

- [14] BRAUN S., *Fast Dynamic Tests for On - Line Measurements on Machine Tools*, Annals of the CIRP, 1973, 22, 1, 113–114.
- [15] BURDEKIN M., COWLEY A., TLUSTY J., *Establishing Standard Cutting Conditions for Performance Testing of Universal Metal Cutting Machine Tools*, Proc. of the 12th Int. M.T.D.R. Conf. in Manchester 15–17th Sept. 1971, Macmillan Press Ltd., London Basingstoke, 1972, 289–298.
- [16] BURNEY F.A., PANDIT S.M., WU S.M., *A Stochastic Approach to Characterization of Machine Tool System Dynamics under Actual Working Conditions*, Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 98, May 1976, 614–619.
- [17] BUSSMANN W., *Formfehleranalyse beim Planfräsen gehärteter Bauteile*. Fortschritt–Berichte VDI Reihe 2: Fertigungstechnik Nr. 217, VDI Verlag, Düsseldorf, 1991.
- [18] CHANG M., LIN P.P., *On-line Free Form Surface Measurement via Fuzzy-Logic Controlled Scanning Probe*. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39, 537–552.
- [19] CHEN J.C., LOU S.J., *Statistical and Fuzzy-Logic Approaches in On-Line Surface Roughness Recognition Systems for End-Milling Operations*. Int. Journal of Flexible Automation and Integrated Manufacturing, 1998, 6, No. 1&2, 53–78.
- [20] CHEUNG C.F., LEE W.B., *A Theoretical and Experimental Investigation of Surface Roughness Formation in Ultra-Precision Diamond Turning*. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40, No.7, 979–1002.
- [21] CHLEBUS E., *Podstawy kształtowania funkcjonalnych cech i własności układów konstrukcyjnych obrabiarek*. Prace Nauk. Inst. Technol. Masz. i Automat. Politech. Wrocław. nr 50, Seria: Monografie nr 14, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1993.
- [22] CHOUDHURY S.K., GOUDIMENKO N.N., KUDINOV V.A., *On-line Control of Machine Tool Vibration in Turning*. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37, No.7, 801–811.
- [23] CICHOSZ P., *Efektywność kształtowania skrawaniem przedmiotów osiowosymetrycznych w zintegrowanym wytwarzaniu*. Prace Naukowe Inst. Technol. Masz. i Automat. i Politech. Wrocław. nr 70, Seria: Monografie nr 21, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.
- [24] CoroKey. *Poradnik doboru narzędzi*. Sandvik Coromant, 1996.
- [25] DAGNALL H., *Let's Talk Roundness*. Taylor Hobson Ltd., Leicester 1996.
- [26] DAMIR M.N.H., *Approximate Harmonic Models for Roundness*, Wear, 1979, 57, 217–225.
- [27] DELIO T., TLUSTY J., SMITH S., *Use of Audio Signals for Chatter Detection and Control*. Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 114., May 1992, 146–157.
- [28] DONG W., JOE AU Y.H., MARDAPITTAS A., *Machine Tool Chatter Monitoring by Coherence Analysis*, Int. Journal of Production Research, 1992, 30, No.8, 1901–1924.
- [29] ECKSTEIN R., *Beurteilung der statischen Last-Verformungseigenschaften von Werkzeugmaschinen mit Hilfe der quasistatischen Meßtechnik*. Fortschritt–Berichte VDI Reihe 2: Fertigungstechnik Nr 154, VDI Verlag, Düsseldorf 1988.
- [30] EIBELSHÄUSER P., *Anwendung der gestuften Sinusanregung für Frequenzgangmessungen*, Industrie-Anzeiger, 1990, 70, 36–39.
- [31] EIBELSHÄUSER P., *Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung*, Forschungsberichte B. 26, Inst. für WZM der TU München, Springer Verlag, Berlin–Heidelberg–New York–London–Paris–Tokyo–Hong Kong 1990.

- [32] EITZENBERGER H., *Führungsfehler und Rauheit. Führungsfehler von Drehmaschinen mit Tastschnittmessungen beurteilen*. wt Produktion und Management, 1997, 87, 115–120.
- [33] EL BARADIE M.A., *Statistical Analysis of the Dynamic Cutting Coefficients and Machine Tool Stability*, Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 115, May 1993, 205–215.
- [34] EMAN K.F., KIM K.J., *Modal Analysis of Machine Tool Structures Based on Experimental Data*, Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 105, November 1983, 282–287.
- [35] ESPRIT III, Project #8750 AMOSE. (Accompanying Measure on Manufacturing Systems in Esprit). Deliverable D4: *Strategy for Future R&D* (Research & Development), RWTH Aachen 1995.
- [36] EVINS D.J., *Modal Testing: Theory and Practice*. Research Studies Press Ltd., John Wiley & Sons Inc., New York, Brisbane, Chichester, Toronto, Singapore 1984.
- [37] FELD M., KONCZAKOWSKI A., *Zastosowanie analizy widmowej do badań struktury geometrycznej powierzchni*. Mechanik, 1991, nr 2.
- [38] FELTEN K., *Die Gestaltung von Fertigungssystemen zur Bearbeitung von Rotationsteilen*, RWTH, Aachen 1977.
- [39] GENSCHOW H., *VDI-Z-Datenbank für Werkzeugmaschinen*. VDI-Z, 1991, 133, Nr. 6, 57–62.
- [40] GENSCHOW H., *Technisch - preisliche Bewertung von Werkzeugmaschinen*, VDI-Z, 1992, 134, Nr. 5, 55–58.
- [41] GENSCHOW H., HARNISCH H.G., *Auswahl einer optimalen Werkzeugmaschine*. VDI-Z, 1989, 131, Nr. 8, 38–42.
- [42] GRANOW R., *Strukturanalyse von Werkstückspektren. Planungshilfsmittel beim Aufbau flexibel automatisierter Fertigungen*. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2: Betriebstechnik, Nr. 74., VDI Verlag, Düsseldorf 1984.
- [43] GROSSMANN K., JUNGnickel G., *Genauigkeitssteigerung an Werkzeugmaschinen. Modellbasierte Kompensation thermisch bedingter Verlagerungen im Arbeitsraum*. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 1999, 94, Nr. 6, 320–323.
- [44] HAGIWARA I., NAGABUCHI K., ARAI A., *Study of Structure Identification Method Using Sensitivity Analysis*, JSME International Journal, Series III, 1989, 32, No. 2, 223–232.
- [45] HASSELMANN U., *Werkstückanalyse auf der Basis multivarianter statistischer Verfahren*, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2: Fertigungstechnik Nr. 157, VDI Verlag, Düsseldorf 1988.
- [46] HEISEL U., KRONDORFER H., *Application of the Surface Method for Vibration Analysis to CNC-routers*, Proc. of the 13th Int. Wood Machining Seminar, June 17-20, 1997, Vancouver, 253–264.
- [47] HEISEL U., KRONDORFER H., *Oberflächenverfahren zur Schwingungsanalyse*, HOB, 1996, 43, No. 9, 85–92.
- [48] HEYLEN W., LAMMENS S., SAS P., *Modal Analysis Theory and Testing*. Katholieke Universiteit Leuven, Heverle 1997.
- [49] ILCZYSZYN J., AUGUSTYNOWICZ J., AUGUL K., GRZĄDZIEL P., KRZYŻANOWSKI J., ŁOŻYŃSKI B., PIETRUS P., SKOCZYŃSKI W., *Opracowanie systemu ekspertowego do projektowania wałów i zespołów wrzecionowych obrabiarek do metali*. Raporty Inst. Technol. Masz. i Automat. Politech. Wrocław. Serii: Sprawozdania Nr 7/2000, Wrocław 2000.

- [50] ILCZYSZYN J., KRZYŻANOWSKI J., SKOCZYŃSKI W., *Zagadnienie oceny własności w komputerowo wspartym konstruowaniu zespołów wrzecionowych obrabiarek*. [W:] *Komputerowo wspomagane projektowanie i badanie obrabiarek*, Posiedzenie Sekcji Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn PAN 6 listopada 1991, Prace Naukowe Inst. Technol. Masz. i Automat. Politech. Wrocław. Nr 46, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1991, 25–32.
- [51] JAKUBIEC W., MALINOWSKI J., *Metrologia wielkości geometrycznych*. WNT, Warszawa 1999.
- [52] JANECKI D., ADAMCZAK., *Metody komputerowej korekcji wybranych systematycznych błędów pomiaru zarysów okrągłości*. Metrologia i systemy pomiarowe, T. V, 1998, z. 3, 153–164.
- [53] JANG D.Y., CHOI Y., KIM H., HSIAO A., *Study of the Correlation Between Surface Roughness and Cutting Vibrations to Develop an On-line Roughness Measuring Technique in Hard Turning*. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36, No. 4, 453–464.
- [54] JEZIERSKI J., *Analiza tolerancji i niedokładności pomiarów w budowie maszyn*. WNT, Warszawa 1994.
- [55] KEDZIORA H.J., *Automatic Selection of Cutoff Wavelength in Roughness Measuring Instruments*. Proceedings & Posters of X. International Colloquium on Surfaces, Chemnitz Jan. 31 – Feb. 02, 2000, Shaker Verlag, Aachen 2000, 538–542.
- [56] KEMMERLING-LAMPARSKY M., *Dynamische Stabilisierung spanender Fertigungsprozesse mit aktiven Zusatzsystemen*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11: Schwingungstechnik Nr. 94, VDI Verlag, Düsseldorf 1987.
- [57] KERSTEN A., *Geometrisches Verhalten von Werkzeugmaschinen unter statischer und thermischer Last*, RWTH, Aachen 1983.
- [58] KOCH J., ILCZYSZYN J., KRZYŻANOWSKI J. W., *Wrzeciona obrabiarek*. WNT, Warszawa 1982.
- [59] KOCH J., KRZYŻANOWSKI J., MICHALAK M., SKOCZYŃSKI W. SZYMKOWSKI J., WEISS A., *Statyczne i dynamiczne badania tokarki TUR 630M*, Raporty Inst. Technol. Bud. Masz. Politech. Wrocław. Serii Sprawozdania Nr 5, Wrocław 1986.
- [60] KOCH J. KRZYŻANOWSKI J., SKOCZYŃSKI W., SZYMKOWSKI J., ILCZYSZYN J., *Badanie własności dynamicznych napędu głównego i analiza zjawisk zachodzących w procesie toczenia związanych ze stabilnością i dokładnością powierzchni*, Raporty Inst. Technol. Masz. i Automat. Politech. Wrocław. Serii Sprawozdania Nr 18/96, Wrocław 1996.
- [61] KOHLHAGE E., *Über den Zusammenhang zwischen ISA-Toleranz und Oberflächengüte in der spanenden Fertigung*. Werkstattstechnik, 1965, 55, Nr. 5, 230–234.
- [62] KOHLHAGE E., *Über den Zusammenhang zwischen ISA-Toleranz und Oberflächengüte in der spanenden Fertigung*. Werkstattstechnik, 1965, 55, Nr. 6, 280–285.
- [63] KOPS L., GOULD M., MIZRACH M., *Improved Analysis of the Workpiece Accuracy in Turning Based on the Emerging Diameter*, Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 115, August 1993, 253–257.
- [64] KRZYŻANOWSKI J., *Methode zur experimentellen Ermittlung der dynamischen Kennlinie der Werkzeugmaschine*, 16. Gemeinsames Werkzeugmaschinen-seminar, Technische Universität Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Fluidtechnik, Dresden, October 1993, 59–64.
- [65] KRZYŻANOWSKI J., *Własności układu konstrukcyjnego obrabiarek skrawających. Zagadnienia oceny ze względu na dokładność kształtowania*. Prace Naukowe Inst. Technol. Bud. Masz.

- Politech. Wrocł. Nr 43, Seria: Monografie Nr 10, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.
- [66] KRZYŻANOWSKI J., AUGUSTYNOWICZ J., SKOCZYŃSKI W., SZYMKOWSKI J., *Rozwinięcie metodyki oceny statycznych własności konstrukcji głównej tokarki*, Raporty Inst. Technol. Bud. Masz. Politech. Wrocł., Seria Sprawozdania Nr 89, Wrocław 1987.
- [68] KRZYŻANOWSKI J., SKOCZYŃSKI W., *Problemy wyznaczania dynamicznych charakterystyk obrabiarek*, W: Automatyzacja produkcji. Problemy kształcenia i wdrażania, Prace Naukowe Inst. Technol. Bud. Masz. Politech. Wrocł. Nr 53, Seria: Konferencje Nr 21, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1994, 209–214.
- [69] KRZYŻANOWSKI J., SKOCZYŃSKI W., *System zur Bewertung des statischen Verformungsverhaltens der Drehmaschinen*, 16. Gemeinsames Werkzeugmaschinen-seminar, Technische Universität Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Fluidtechnik, Dresden, October 1993, 65–78.
- [69] KRZYŻANOWSKI J., SKOCZYŃSKI W., *Uwzględnienie eksploatacyjnej zmienności stanów obciążenia przy sprawdzaniu odkształcalności układów konstrukcyjnych maszyn*, Przegląd Mechaniczny, 1994, Nr 5-6, 33–39.
- [70] KRZYŻANOWSKI J., SKOCZYŃSKI W., AUGUSTYNOWICZ J., DZWONIAREK J., *Opracowanie metodyki i kryteriów oceny statycznych własności tokarek*. Raporty Inst. Technol. Bud. Masz. Politech. Wrocł. Seria Sprawozdania Nr 82, Wrocław 1987.
- [71] KRZYŻANOWSKI J., SKOCZYŃSKI W., ILCZYSZYN J., *Bewertung des Verformungsverhaltens beim rechnergestützten Konstruieren von Werkzeugmaschinen*, Int. Conf. on Computer Integrated Manufacturing, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Nr 1237, Mechanika z. 117, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1994, 423–430.
- [72] KRZYŻANOWSKI J., SKOCZYŃSKI W., ILCZYSZYN J., *Optymalizacja rozstawu podpór wrzecion obrabiarek*, Przegląd Mechanika, 1989, 48, nr 4, 25–28.
- [73] KURTOGLU A., *The Accuracy Improvement of Machine Tools*. Annals of the CIRP, 1990, 39, No. 1, 417–419.
- [74] LEE A.C., LIU C.S., CHIANG S.T., *Analysis of Chatter Vibration in a Cutter - Workpiece System*, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1991, 31, No. 2, 221–234.
- [75] LESCH U., KUBACKI W., *Auswahl repräsentativer Werkstücke mit dem PC*, VDI-Z, 1992, 134, Nr. 4, 37–39.
- [76] LIN Z.H., HODGSON D.C., *In - Process Measurement and Assessment of Dynamic Characteristics of Machine Tool Structures*, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1988, 28, 93–101.
- [77] LIN S.C., CHANG M.F., *A Study on the Effects of Vibration on the Surface Finish using a Surface Topography Simulation Model for Turning*. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38, 763–782.
- [78] LISEWSKI W., BODNAR A., BERCZYŃSKI S., MARCHELEK K., *Analiza słabych ogniw obrabiarki ze względu na stabilność obróbki. Cz. I: Metodyka badań*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 1993, z. 12, 391–402.
- [79] LISEWSKI W., BODNAR A., BERCZYŃSKI S., MARCHELEK K., *Analiza słabych ogniw obrabiarki ze względu na stabilność obróbki. Cz. II: Analiza wyników badań*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 1993, z. 12, 403–421.

- [80] LIU Q., ZHANG C., WANG H.P.B., *Form – Accuracy Analysis and Prediction in Computer Integrated Manufacturing*. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37, 237–248.
- [81] LU B.H., LIN Z.H., HWANG X.T., KU C.H., *On - Line Identification of Dynamic Behaviour of Machine Tool Structures During Stable Cutting*. Annals of the CIRP, 1983, 32, No. 1, 315–318.
- [82] LUDERICH J., *Hochgenaue Spindelsysteme. Untersuchungen über die Laufgenauigkeit und deren Einfluß auf das Bearbeitungsergebnis*. Berichte aus der Produktionstechnik, B. 3, Verlag Shaker, Aachen 1994.
- [83] LYONS R.G., *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. WKŁ, Warszawa 1999.
- [84] MAKOWSKI R., KRZYŻANOWSKI J., SKOCZYŃSKI W., *Problemy analizy sygnałów siły skrawania i przemieszczeń względnych między przedmiotem a narzędziem*. W: Metody doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn roboczych, technologicznych oraz środków transportu, Konferencja Naukowa Szklarska Poręba 15–18 maja 1995r., T. 2, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław – Szklarska Poręba 1995, 99–108.
- [85] MARCHELEK K., *Dynamika obrabiarek*, WNT, Warszawa 1991.
- [86] MARCHELEK K., *Kształtowanie wibrostabilności systemu obrabiarka – proces skrawania. Cz. I: Modelowanie systemu obrabiarka–proces skrawania*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 1998, 18, nr 2, 167–188.
- [87] MARCHELEK K., *Kształtowanie wibrostabilności systemu obrabiarka – proces skrawania. Cz. II: Algorytm kształtowania wibrostabilności systemu obrabiarka–proces skrawania*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 1998, 18, nr 2, 189–211.
- [88] MARCHELEK K., POWAŁKA B., *Method of Determination of the Global Sensitivity Index of Vibrostability Limit of Machine Tool–Cutting Process System using Fuzzy Sets Theory*. Advances in Manufacturing Science and Technology, 2000, 24, No. 4, 33–41.
- [89] MARCHELEK K., SKRODZEWICZ J., TOMKÓW J., *Doświadczalne badania dynamicznych charakterystyk procesu skrawania przy toczeniu ortogonalnym*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1988, z. 3-4, 3–17.
- [90] MARCHELEK K., SKRODZEWICZ J., TOMKÓW J., *Stanowisko do doświadczalnego badania dynamicznych charakterystyk procesu skrawania*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1983, z. 4, 3–18.
- [91] MICHAELIS D., *Rechnergestützte Werkstückanalyse zur Auslegung von Fertigungsmitteln*, Industrie Anzeiger, 1982, 104, Nr. 83, 40–41.
- [92] MILBERG J., *Werkzeugmaschinen-Grundlagen: Zerspanntechnik, Dynamik, Baugruppen und Steuerungen*. Springer Verlag, Berlin–Heidelberg–New York–London–Paris–Tokyo–Hong Kong–Barcelona–Budapest 1992.
- [93] MITSUI K., SATO H., *A Study on the Effect of the Structural Vibration of Machine Tool to the Circumferential Surface Roughness*. Proc. of the 19th Int. M.T.D.R. Conf. in Manchester, September 1978, Macmillan Press Ltd., London Basingstoke 1979, 391–398.
- [94] MODEMAN K., *Schwingungsbedingte Werkstückoberflächenmodulationen bei der Ultra-präzisionsbearbeitung*. RWTH, Aachen 1989.
- [95] MORIWAKI T., IWATA K., *In-Process Analysis of Machine Tool Structure Dynamics and Prediction of Machining Chatter*, Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 98, Feb. 1976, 301–305.

- [96] MUMMERY L., *Surface Texture Analysis*. The Handbook. Hommelwerke GmbH, Mühlhausen 1992.
- [97] NATKE H.G., *Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse*, Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden 1988.
- [98] NOWICKI B., *Aktywne pomiary chropowatości powierzchni*. Mechanik, 1993, Nr 1, 29–32.
- [99] NOWICKI B., *Kierunki rozwoju metrologii struktury geometrycznej powierzchni*. Prace Naukowe Inst. Technol. Masz. i Automat. Politech. Wrocł. Nr 52, Seria Konferencje Nr 20, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1993.
- [100] NOWICKI B., *Struktura geometryczna – chropowatość i falistość powierzchni*. WNT, Warszawa 1991.
- [101] OCZOŚ K.E., LUBIMOW W., *Nowe aspekty trójwymiarowej (3D) analizy chropowatości powierzchni obrobionej*. Mechanik, 1998, 71, Nr 8–9, 471–476.
- [102] *Operator's Handbook*. TALYROND 265. Taylor Hobson Ltd., Leicester 1998.
- [103] *Operator's Handbook. The Form Talysurf Series*. Rank Taylor Hobson Ltd., Leicester.
- [104] OPITZ H., HERRMANN J., EVERSHEIM W., *Untersuchungen über die technische Ausnutzung von Werkzeugmaschinen und Ermittlung von Werkstückcharakteristiken zur Auslegung und Auswahl von Werkzeugmaschinen*. Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen 1966.
- [105] OPITZ H., KOHLHAGE E., *Zuordnung der Oberflächengüte zur ISO-Masstoleranz*. Forschungsbericht des Landes Nordrhein – Westfalen, Nr. 1331, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen 1964.
- [106] OSANNA P.H., *Deviations and Tolerances of Position in Production Engineering*, Wear, 1986, 109, 157–170.
- [107] OSANNA P.H., *Deviations in Form and Workpiece Accuracy*, Wear, 1982, 83, 265–274.
- [108] OSANNA P.H., *Einfluß von Oberflächenrauheit und Formfehlern auf die Werkstückgenauigkeit*, Maschinenmarkt, 1980, 86, 281–284.
- [109] OSANNA P.H., *Surface Roughness and Size Tolerance*, Wear, 1979, 57, 227–236.
- [110] OSANNA P.H., TOTOWA P., *Workpiece Accuracy - The Critical Path to Economical Production*, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1992, 32, No. 1/2, 45–49.
- [111] PANDIT S.M., *Characteristic Shapes and Wavelength Decomposition of Surface in Machining*, Annals of the CIRP, 1981, 30, No. 1, 487–492.
- [112] Praca zbiorowa, *Poradnik Inżyniera. Obróbka skrawaniem*. T.1, WNT, Warszawa 1991.
- [113] Praca zbiorowa, *Poradnik Inżyniera. Obróbka skrawaniem*. T.2, WNT, Warszawa 1991.
- [114] RAHMAN M., *In-Process Detection of Chatter Threshold*, Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 110, February 1988, 44–50.
- [115] RAHMAN M., ITO Y., *A Method to Determine the Chatter Threshold*. Proc. of the 19th Int. M.T.D.R. Conf. in Manchester, September 1978, Macmillan Press Ltd., London Basingstoke 1979, 191–196.
- [116] RAHMAN M., NARANAYAN V., *Optimization of Error-of-Roundness in Turning Processes*. Annals of the CIRP, 1986, 35, No. 1, 377–380.
- [117] RAO B.C., SHIN Y.C., *A Comprehensive Dynamic Cutting Force Model for Chatter Prediction in Turning*. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39, 1631–1654.
- [118] RAU N., HERCKE T., SEIBOLD M., *Welligkeit nicht länger Stiefkind*. Werkstatt und Betrieb, 1998, 131, Nr. 11, 1022–1025.

- [119] SATA T., LI M., TAKATA S. HIRAOKA H., LI C.Q., XING X.Z., XIAO X.G., *Analysis of Surface Roughness Generation in Turning Operation and its Applications*. Annals of the CIRP, 1985, 34, No. 1, 473–476.
- [120] SAWABE M., *Analyse von Einflußfaktoren auf die Formabweichung vom Zylinder und Ermittlung der Toleranzen*. Feingerätetechnik, 1976, 25, Nr. 2, 63–66.
- [121] SHAWKY A.M., ELBESTAWI M.A., *In - Process Evaluation of Workpiece Geometrical Tolerances in Bar Turning*. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36, No. 1, 33–46.
- [122] SHI D., *Ermittlung der modalen Größen von Werkzeugmaschinen im Betriebszustand mit einem AR (ARMA) - Model*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 11: Schwingungstechnik Nr. 151, VDI-Verlag, Düsseldorf 1991.
- [123] SHIN Y.C., EMAN K.F., WU S.M., *Experimental Complex Modal Analysis of Machine Tool Structures*, Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 111, May 1989, 116–124.
- [124] SKOCZYŃSKI W., *Analiza charakterystyk śladów obróbki w aspekcie skutków drgań obrabiarki*. W: IV Konf. Nauk. Metody dośw. w bud. masz., Agencja Wyd. "Argi", T. 2, Wrocław 1999, 221–230.
- [125] SKOCZYŃSKI W., *Metoda wyznaczania charakterystyk dynamicznych układów konstrukcyjnych tokarek z zastosowaniem wymuszeń procesem skrawania*, W: Seminarium projektów badawczych finansowanych przez KBN w 1998 roku, Radom 14–15 grudnia 1998 r., KBN, Zespół Mechaniki, Bud. i Arch., Wyd. i Zakład Poligrafii Inst. Technol. Ekspł., Radom 1999, 393–397.
- [126] SKOCZYŃSKI W., *Ocena własności statycznych tokarek w warunkach ruchowych*. Prace Naukowe Inst. Technol. Masz. i Automat. Politech. Wrocł. Nr 78, Seria Konferencje Nr 36, Wrocław 2000, 215–218.
- [127] SKOCZYŃSKI W., *Ogólna metodyka oceny własności obrabiarek*. Prace Naukowe Inst. Technol. Maszyn i Automat. Politech. Wrocł. Nr 78, Seria Konferencje Nr 36, Wrocław 2000, 219–222.
- [128] SKOCZYŃSKI W., *Wyznaczanie charakterystyk dynamicznych układów konstrukcyjnych tokarek z zastosowaniem wymuszeń procesem skrawania*. W: III Szkoła - Konferencja Metrologia wspomagana komputerowo, T. 3. Granty i projekty celowe. Zegrze k/Warszawy 19-22 maja 1997, Wyd. WSOWŁ, Zegrze 1997, 289–295.
- [129] SKOCZYŃSKI W., DOMAGAŁA J., *Komputerowy system do badań obrabiarek*, W: Podstawy technologii maszyn '91. Prace Naukowe Inst. Technol. Masz. i Automat. Politech. Wrocł. Nr 49, Seria: Konferencje Nr 18, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1991, 331–336.
- [130] SKOCZYŃSKI W., KRZYŻANOWSKI J., *Analiza czynników wpływających na dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotów obrabianych*. Prace Naukowe Inst. Technol. Maszyn i Automat. Politech. Wrocł. Nr 78, Seria Konferencje Nr 36, Wrocław 2000, 223–226.
- [131] SKOCZYŃSKI W., KRZYŻANOWSKI J., *Określenie rozkładu obciążenia przy ocenie statycznych własności konstrukcji głównej tokarki*, W: Komputerowe wspomaganie konstruowania obrabiarek i procesów obróbki skrawaniem CAD–CAM–CIM 88, Prace Naukowe Inst. Technol. Bud. Masz. Politech. Wrocł. Nr 36, Seria Konferencje Nr 13, Wrocław 1988, 238–242.
- [132] SKOCZYŃSKI W., KRZYŻANOWSKI J., *Pomiar drgań względnych między przedmiotem i narzędziem w czasie skrawania*, W: Metody doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn roboczych, technologicznych oraz środków transportu, Konferencja Naukowa Szklar-

- ska Poręba 15–18 maja 1995, T. 2, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław – Szklarska Poręba 1995, 263–272.
- [133] SKOCZYŃSKI W., KRZYŻANOWSKI J., *Porównanie charakterystyk dynamicznych tokarki uzyskanych w trakcie skrawania i w warunkach spoczynkowych*. W: IV Konf. Nauk. Metody dośw. w bud. masz., Agencja Wyd. „Argi”, T. 2, Wrocław 1999, 231–240
- [134] SKOCZYŃSKI W., KRZYŻANOWSKI J., MAKOWSKI R., SZYMKOWSKI J., ILCZY-SZYN J., MOKRZAN S., GRZĄDZIEL P., *Metoda wyznaczania charakterystyk układów konstrukcyjnych tokarek z zastosowaniem wymuszeń procesem skrawania*. Raporty Inst. Technol. Masz. i Automat. Politech. Wrocł. Serii Sprawozdania Nr 10 (Raport końcowy z realizacji proj. bad. nr rej. 7 T07D 009 10), Wrocław 1999.
- [135] SKOCZYŃSKI W., SZYMKOWSKI J., *Metodyka oceny błędów współosiowości łożysk tocznych*, Przegląd Mechanika, 1987, 46, nr 12, 5–8.
- [136] SPUR G., STÖFERLE T., *Handbuch der Fertigungstechnik – B. 3/1 Spanen*. Carl Hanser Verlag, München–Wien 1979.
- [137] STONE B.J., *The Development of a Dynamic Performance Test for Lathes*. Proc. of the 12th Int. M.T.D.R. Conf. In Manchester 15-17th, September 1971, Macmillan Press Ltd., London Basingstoke 1972, 299–308.
- [138] SUBRAMANI G., KAPOOR S.G., DE VOR R.E., *A Model for the Prediction of Bore Cylindricity during Machining*. Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 1993, 115, 15–22.
- [139] ŚLAŹAK Ł., *Przeciwdziałanie wpływowi odkształceń termicznych obrabiarek na dokładność obróbki*. Mechanik, 1999, nr 10, 637–639.
- [140] ŚNIECHOWSKI R., KASZYŃSKI R., *Instrukcja badania prototypów obrabiarek*. Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem Seria Materiały Instruktażowe Nr 110, Kraków 1973.
- [141] TARNG Y.S., YOUNG H.T., LEE B.Y., *An Analytical Model of Chatter Vibration in Metal Cutting*, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1994, 34, No. 2, 183–197.
- [142] THOMAS T.R., *Trends in surface roughness*. Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38, No. 5–6, 405–411.
- [143] THOMPSON R.A., *Chatter Growth - Tests to Evaluate the Theory*, Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 110, November 1988, 344–351.
- [144] TOMKÓW J., *Wibrostanowalność obrabiarek. Komputerowe wspomaganie obliczeń i badań doświadczalnych*. WNT- Fundacja Książka Naukowo - Techniczna, Warszawa 1997.
- [145] TOMKÓW J., MARCHELEK K., *Metoda doświadczalnego wyznaczania dynamicznych charakterystyk procesu skrawania w warunkach regeneracji śladu. Cz. I. Podstawy teoretyczne*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1996, 20, Nr 2, 75–87.
- [146] TOMKÓW J., MARCHELEK K., *Metoda doświadczalnego wyznaczania dynamicznych charakterystyk procesu skrawania w warunkach regeneracji śladu. Cz. II. Weryfikacja metody*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1996, 20, Nr 3, 69–80.
- [147] TOMKÓW J., MARCHELEK K., *Modelling Cutting Process in Dynamic Stability Analysis of Machine Tools*, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35, No. 4, 535–545.
- [148] TÖNSHOFF H.K., BUSSMAN J., GRANOW R., *Untersuchung von Werkstückspektren bei der Entwicklung eines Fertigungssystems zur Drehteilbearbeitung*, VDI-Z, 1981, 17, 721–727.
- [149] TÖNSHOFF H.K., EHRMANN M., *Toleranzbasierte Auswahl von Werkzeugmaschinen für die Fräsbearbeitung*. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 1999, 94, Nr. 5, 260–263.

- [150] TRUMPOLD H., HELDT E., *Why Filtering Surface Profiles?* Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38, No. 5–6, 639–646.
- [151] VOS M. SCHMIDT A., *Geomerisches und kinematisches Maschinenverhalten*. W: Seminar Steigerung der Genauigkeit von Werkzeugmaschinen. Messung–Beurteilung–Optimierung. 23–24. November 1995, ADITEC, Aachen 1995.
- [152] WANG W.R., CHANG C.N., *Dynamic Analysis and Design of a Machine Tool Spindle - Bearing System*, Trans. of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics, 116, July 1994, 280–285.
- [153] WARNECKE H.J., MELCHIOR K.W., AHLERS R.J., KRING J., *Handbuch Qualitätstechnik. Methoden und Geräte zur effizienten Qualitätssicherung*. Verlag Moderne Industrie, Stuttgart 1989.
- [154] WECK M., *Dynamisches Verhalten spanender Werkzeugmaschinen. Einflußgrößen, Beurteilungsverfahren, Meßtechnik*. RWTH, Aachen 1971.
- [155] WECK M., *Werkzeugmaschinen – Fertigungssysteme, B. 2, Konstruktion und Berechnung*, VDI-Verlag, Düsseldorf 1991.
- [156] WECK M., *Werkzeugmaschinen - Fertigungssysteme, B. 4., Meßtechnische Untersuchung und Beurteilung*, VDI-Verlag, Düsseldorf 1992.
- [157] WECK M., HANRATH G., *Abnahme spanender Werkzeugmaschinen in Form einer Fähigkeitsuntersuchung*. VDI-Z, 1994, 136, Nr. 9.
- [158] WECK M., HANRATH G., *Abnahme von spanenden Werkzeugmaschinen*, Forschungsbericht VDW 0157/1, Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der RWTH Aachen, Januar 1995.
- [159] WECK M., HANRATH G., *Fähigkeitsuntersuchungen an Werkzeugmaschinen*. W: Seminar Steigerung der Genauigkeit von Werkzeugmaschinen. Messung–Beurteilung–Optimierung. 23–24. November 1995, ADITEC, Aachen 1995.
- [160] WECK M., KERSTEN A., *Systematische Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Betriebsbedingungen auf die statischen und dynamischen Kennwerte spanender Werkzeugmaschinen*, Forschungsbericht VDW 0127, Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der RWTH Aachen, Juni 1981.
- [161] WECK M., STAVE H., BONSE R., *Studie zum Thema Abnahmebedingungen an Werkzeugmaschinen. Bestandsaufnahme und Problemanalyse*, Forschungsbericht VDW 0157, Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der RWTH Aachen, März 1992.
- [162] WIECZOROWSKI M., *Analiza wpływu drgań na pomiary chropowatości powierzchni*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 1998, 18, nr 2, 77–91.
- [163] WROTONY L.T., *Projektowanie obrabiarek. Zagadnienia ogólne i przykłady obliczeń*. WNT, Warszawa 1986.
- [164] YOSHIMURA M., *Evaluation of Forced and Self-Excited Vibrations at the Design Stage of Machine-Tool Structures*. Trans. of the ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, 108, September 1986, 323–329.
- [165] ŻABA K., *Model systemu gospodarki narzędziowej*. Praca doktorska (nie publ.). Inst. Technol. Maszyn i Automat. Polit. Wrocł., Wrocław 1998.
- [166] ŻEBROWSKA-ŁUCYK S., *Kompensacja błędów pozycjonowania w pomiarach współosiowości i średnic metodą bezodniesieniową*. Metrologia i Systemy Pomiarowe, T. 5, z. 1–2, 1998, 97–116.

- [167] ŻEBROWSKA-ŁUCYK S., *Zastosowanie analizy harmonicznej do oceny dokładności powierzchni obrotowych – możliwości i ograniczenia*. W: IV Konferencja – Metrologia w technikach wytwarzania maszyn. Prace Naukowe Inst. Technol. Masz. i Automat. Polit. Wrocław. Nr 52, Seria: Konferencje Nr 20, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1993, 227–230.

NORMY I ZALECENIA

- [168] BN-74/1522-01 *Obrabiarki do metali. Ogólne warunki pomiarów sztywności statycznej*.
- [169] DIN - Taschenbuch 122, *Werkzeugmaschinen 2, Normen über Abnahmebedingungen*, Beuth Verlag, Berlin, Köln 1978.
- [170] DIN 8601 *Werkzeugmaschinen, Abnahmebedingungen für Werkzeugmaschinen für die spanende Bearbeitung von Metallen, Allgemeine Regeln*. Beuth Verlag, Berlin, 1986.
- [171] DIN V 8602: Teil 1. *Verhalten von Werkzeugmaschinen unter statischer und thermischer Beanspruchung. Allgemeine Regeln für die Prüfung von Fräsmaschinen*. Beuth Verlag, Berlin 1990.
- [172] DIN V 8602: Teil 2. *Verhalten von Werkzeugmaschinen unter statischer und thermischer Beanspruchung. Prüfung für Senkrecht – Konsolfräsmaschinen*. Beuth Verlag, Berlin 1990.
- [173] DIN V 8602: Teil 3. *Verhalten von Werkzeugmaschinen unter statischer und thermischer Beanspruchung. Prüfung für Waagerecht – Konsolfräsmaschinen*. Beuth Verlag, Berlin 1990.
- [174] DIN 8605 *Werkzeugmaschinen. Drehmaschinen mit erhöhter Genauigkeit. Umlaufdurchmesser bis 500 mm, Drehlänge bis 1500 mm. Abnahmebedingungen*. Beuth Verlag, Berlin, 1976.
- [175] DIN 8606 *Werkzeugmaschinen. Drehmaschinen mit normaler Genauigkeit. Umlaufdurchmesser bis 800 bis 1600 mm. Abnahmebedingungen*. Beuth Verlag, Berlin, 1976.
- [176] ISO 230/1: 1986 (E) *Acceptance code for machine tools - Part 1: Geometric accuracy of machine operating under no - load or finishing conditions*.
- [177] ISO 230 - 2: 1988 (E) *Acceptance code for machine tools - Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled machine tools*.
- [178] ISO 1701: 1974 *Test conditions for milling machines with table of variable height, with horizontal or vertical spindle. Testing of the accuracy*.
- [179] ISO 1708: 1989 (E) *Acceptance conditions for general purpose parallel lathes. Testing of the accuracy*.
- [180] ISO 1984: 1984 *Test conditions for milling machines with table of fixed height, with horizontal or vertical spindle. Part 0: General introduction*.
- [181] ISO 1986: 1985 *Acceptance conditions for surface grinding machines with horizontal grinding wheel spindle and reciprocating table. Testing of accuracy*.
- [182] ISO 2772/1: 1973 *Test conditions for box type vertical drilling machines. Testing of the accuracy. Part 1: Geometrical tests*.
- [183] ISO 3070/0: 1982 *Acceptance conditions for boring and milling machines with horizontal spindle. Testing of the accuracy. Part 0: General introduction*.
- [184] ISO 4291: 1985. *Methods for the assessment of departure from roundness. Measurement of variations in radius*.
- [185] ÖNORM M1116: *Oberflächenrauheit und ISO – Toleranzqualität*. 1988.

- [186] PN-EN 20286-1:1996 *Układ tolerancji i pasowań ISO. Podstawy tolerancji odchyłek i pasowań.*
- [187] PN-ISO 230-1: 1998 *Przepisy badania obrabiarek. Dokładność geometryczna obrabiarek pracujących bez obciążenia lub w warunkach obróbki wykańczającej.*
- [188] PN-ISO 230-2: 1999 *Przepisy badania obrabiarek. Wyznaczanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie.*
- [189] PN-ISO 230-4: 1999 *Przepisy badania obrabiarek. Badania okrągłości w obrabiarkach sterowanych numerycznie.*
- [190] PN-ISO 3274: 1997 *Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Charakterystyki nominalne przyrządów stykowych (z ostrzem odwzorowującym).*
- [191] PN-ISO 10816-1:1998 *Drgania mechaniczne. Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach niewirujących.*
- [192] PN-78/M-02137 *Tolerancje kształtu i położenia. Nazwy i określenia.*
- [193] PN-80/M-02138 *Tolerancje kształtu i położenia. Wartości.*
- [194] PN-78/M-02139 *Odchyłki wymiarów nietolerowanych.*
- [195] PN-87/M-04251 *Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Wartości liczbowe parametrów.*
- [196] PN-74/M-04255 *Struktura geometryczna powierzchni. Falistość powierzchni. Określenia podstawowe i parametry.*
- [197] PN-87/M-04256/02 *Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Terminologia ogólna.*
- [198] PN-93/M-04260 *Pomiar okrągłości. Terminy, definicje i parametry okrągłości.*
- [199] PN-93/M-04262 *Metody oceny odchyłek okrągłości. Pomiar zmian promieni.*
- [200] PN-86/M-55552 *Obrabiarki do metali. Przedmioty próbne do sprawdzania dokładności. Wymagania ogólne.*
- [201] PN-94/M-55651 *Warunki odbioru tokarek kłowych. Badanie dokładności.*
- [202] PN-60/M-55657 *Obrabiarki do metali. Tokarki rewolwerowe o średnicy przelotu nad łożem do 630 mm. Sprawdzanie dokładności.*
- [203] PN-90/N-01358 *Drgania. Metody pomiarów i oceny drgań maszyn.*
- [204] Projekt normy PN-86/M-.... *Metoda badań i dopuszczalne wartości parametrów drgań wymuszonych.*
- [205] VDI – Richtlinien 2056 (1964), *Beurteilungsmaßstäbe für mechanische Schwingungen von Maschinen.*
- [206] VDI – Richtlinien 2851 (1986), B. 1, *Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen. Beurteilung von Bohrmaschinen durch Einfachprüfwerkstücke.*
- [207] VDI – Richtlinien 2851 (1986), B. 2, *Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen. Beurteilung von NC-Drehmaschinen durch Einfachprüfwerkstücke.*
- [208] VDI – Richtlinien 2851 (1986), B. 3, *Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen. Beurteilung von Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren durch Einfachprüfwerkstücke.*
- [209] VDI – Richtlinien 3219 (1965), *Oberflächenrauheit und Masstoleranz in der spanenden Fertigung.*

- [210] VDI/DGQ – Richtlinien 3441 (1977), *Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen. Grundlagen.*
- [211] VDI/DGQ - Richtlinien 3442 (1977), *Statistische Prüfung der Arbeitsgenauigkeit von Drehmaschinen.*
- [212] VDI/DGQ – Richtlinien 3443 (1977), *Statistische Prüfung der Arbeitsgenauigkeit von Fräsmaschinen.*
- [213] VDI/DGQ – Richtlinien 3444 (1977), *Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Koordinaten-Bohrmaschinen und Bearbeitungszentren.*
- [214] VDI/DGQ – Richtlinien 3445 (1977) B. 1. *Statistische Prüfung der Arbeitsgenauigkeit von Schleifmaschinen. Grundlagen.*
- [215] VDMA 8669 (1995) *Fähigkeitsuntersuchung zur Abnahme spanender Werkzeugmaschinen.*
- [216] WOT-82/CBKO-100... *Wytyczne do opracowania programu prób i badań prototypu dla obrabiarek skrawających do metali*, Wyd. CBKO Nr 046, Pruszków 1982.

EVALUATION OF MACHINE TOOL PROPERTIES BASED ON MACHINING ACCURACY OF TEST PIECES

The aim of the study presented in the monograph is to work out a comprehensive method for evaluating properties of machine tools structures and their performance characteristics based on machining accuracy of test pieces and taking into account desired production tasks. There is still a great need for such methods as is clearly seen from a review of procedures used in testing of machine tools both in the laboratory and on the plant floor (Chapt. 2). It can be said that at the moment there are no truly workable methods for evaluating properties of the machine tool structure. This is primarily due to the lack of suitable evaluation criteria and sound reference values as well as to insufficient knowledge concerning relationships between properties of machine tool and its basic operational functions. Assessment of machine tool parameters is now usually done based on indexes or reference parameters a priori adopted by a designer or a user. What is more, there are no manufacturer- or user-independent methods of evaluation that could account for the machine's range of application or the desired manufacturing tasks.

The present approach to evaluation assumes actual operational loads and manufacturing performance of a machine tool as crucial factors of evaluation (Sect. 5.1). The presented comprehensive method assumes a machine tool to be loaded in the same manner as during a stable finishing process. Load conditions and the corresponding configurations of the working units depend on desired machining tasks. They result from dimensional analysis of a variety of workpieces that a machine is capable of dealing with. Machining accuracy is assessed by measuring and analyzing dimensional deviations of test pieces.

Evaluation indexes were established (Sect. 5.2) that are able to account for relationships between properties of the machine tool structure and machining accuracy. A notion "properties of machine tool structure" was in this study confined to the deformability of this structure, which kind depends on the nature of operating loads. The effects of deformations expressed in geometrical and form deviations of machined workpiece were evaluated. The proposed indexes allow an investigator to arrive not only at a complete picture of the relation between these properties and ISO accuracy grade but also at estimates of particular effects of static, dynamic or geometrical properties of the machine or of cutting process conditions on this grade. These indexes can be made insensitive to specific conditions of a given cutting process (Sect. 6.8.4). A ge-

neral procedure was formulated for determination of the indexes based on structural analysis and on desired machining tasks that gives some directions relative to the loads distribution in the working space (Sect. 5.3, 6.3 and 6.4), the selection of representative workpieces, tools, cutting parameters and instrumentation (Sect. 5.4 and 6.5). The manner the cutting tests are to be conducted and the dimensional deviations of a workpiece measured was determined in Sect. 5.5 and 6.6.

The presented indexes explain clearly how the machine tool properties affect dimensional tolerances, form errors and finish quality of the workpiece (Sect. 5.2). The indexes are expressed as numbers of the continuous distribution of the ISO accuracy grade (see Fig. 5.2). They can be juxtaposed with clearly defined reference values in the form of ISO accuracy grades corresponding to particular machining operations. It is also possible to perform a partial evaluation using absolute values of a given type of permissible deviations and comparing the measured deviations with the reference values given in Tables 4.1, 4.2 and 4.4. The indexes enable design variants of a machine tool or various units of the same make to be compared.

A particular form of the indexes is dependent upon the purpose of the machine tool evaluation since they are defined with respect to prototype and acceptance tests (Sect. 5.2). The global and local evaluation indexes recommended for prototype studies can be helpful in identifying malfunctions and performing design changes. The acceptance evaluation indexes enable the tests to be conducted in a short time and their values are close to the global index values. The indexes can be used in evaluating quality of the machine tool structure. The proposed method and the established indexes and criteria can be implemented in formal procedures of design and optimization of structural components of individual machines and flexible machining systems (Sect. 5.7).

Experimental verification of the evaluation method was done on a medium-size universal lathe (Sect. 6.1). The tests proved the method to be capable of accounting for the effect of both the machine tool structure properties and the machining process conditions on dimensional-geometrical accuracy of the workpiece. The indexes were found to be sensitive to changes in the configuration of the machine tool structure (Sect. 6.8).

The study allows the author to formulate the following conclusions:

1. The proposed method for evaluating structural properties of machine tools and their performance characteristics enables an investigator to prescribe clear quantitative evaluation indexes and express them similarly to ISO accuracy grades. A designer and a user can use such indexes to make an efficient evaluation concerning structural and functional qualities of a machine.

2. The comprehensive method can be used for analyzing the effect of both the machine structure properties and the cutting process conditions on workpiece machining accuracy due to its sensitivity to the structural parameters and process variables.

3. The method allows for actual working loads that are inferred from the desired machining tasks and for level of dimensional-geometrical accuracy of workpiece. Properties of a machine and its operational performance are evaluated based on indexes accounting for dimensional deviations, form deviations and roughness of machined surfaces.

4. The proposed indexes are universal in character. They can be used either in global evaluation of a machine tool, be it a prototype or a finished machine to be commissioned, or in partial evaluation of selected properties. The indexes can be referred to the ISO accuracy grade. The values of appropriate measured deviations can be compared with the absolute values of permissible deviations quoted in the monograph.

5. The proposed evaluation criteria and indexes can be integrated within computer aided procedures of design and optimization employed in the machine tool industry. The proposed method is cohesive with these procedures since it makes use of the same input data and it takes into account the same states of configuration and states of load of the structure both in design processes and in experimental study.

6. Workpiece databases are integral part of evaluation procedures since they can generate machining tasks that form the same input data for both design processes and tests done on prototypes and machines put in for acceptance.

7. Experimental verification performed on a universal lathe proved the method to be fully workable and can be considered its practical application when it comes to this class of machines.

8. Experience gained in the course of investigations will be helpful in working out manufacturer- and user-independent recommendations concerning the prototype tests. It can be also a theoretical basis for standardization of acceptance tests in the area of evaluation of test piece machining accuracy.

Verified by Marzena Łucziewicz