



■ ■ BRONISŁAW SŁOWIŃSKI
SYSTEMOWA
OCENA JAKOŚCI
ŚCIERNIC
CERAMICZNYCH

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

Bronisław Słowiński

**SYSTEMOWA OCENA JAKOŚCI
ŚCIERNIC CERAMICZNYCH**

KOSZALIN 2004

Przewodniczący Uczelnianej Rady Wydawniczej
Jarosław Diakun

Recenzenci
Adam Hamrol
Mieczysław Marciniak

Redakcja
Alina Leszczyńska

Projekt okładki
Tadeusz Walczak

Skład, łamanie
Artur Nowotarski
Bronisław Słowiński

© Copyright by Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej
Koszalin 2004

WYDAWNICTWO UCZELNIANE POLITECHNIKI KOSZALIŃSKIEJ
75–620 Koszalin, ul. Raławicka 15–17

Koszalin 2004, wyd. I, ark. wyd. 9,8, format B–5, nakład 120 egz.
Druk: INTRO-DRUK, Koszalin

Motto

*„Na bardzo dobre wyroby zapotrzebowanie rośnie,
ale żeby je wytwarzać i korzystnie sprzedać,
trzeba je najpierw efektywnie badać – badać z wyprzedzeniem”*

(Andrzej Koziarski)

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE	7
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	13
Rozdział 1	
MODELE SYSTEMOWE OBIEKTU BADAŃ	15
1.1. Podejście systemowe jako metoda badawcza	15
1.2. Stosunki organizacyjne systemów produkcyjnych.....	21
1.3. Budowa narzędzi ściernych w ujęciu systemowym	29
1.4. Jakość jako szczególna cecha środka technicznego	38
1.5. Model systemowej oceny jakości narzędzi ściernych.....	46
Rozdział 2	
DIAGNOSTYKA KONTROLNA ŚCIERNIC CERAMICZNYCH	58
2.1. Analiza metod diagnostyki kontrolnej ściernic ceramicznych.....	58
2.2. Moduł Younga jako kryterium oceny jakościowej ściernic	62
2.3. Podstawy diagnostyki ściernic metodami akustycznymi	69
2.4. Metodyka diagnostyki kontrolnej ściernic płaskich.....	76
2.5. Metodyka diagnostyki kontrolnej ściernic małogabarytowych.....	81
2.6. Metodyka diagnostyki kontrolnej ściernic kształtowych	88
Rozdział 3	
OCENA JAKOŚCI TYPU ŚCIERNIC CERAMICZNYCH	98
3.1. Jakość typu jako stan intencjonalny.....	99
3.2. Badanie modułu E ściernic o konwencjonalnej budowie.....	102
3.3. Badanie modułu E ściernic z modyfikowanego ścierniwa.....	106
3.4. Badanie modułu E ściernic z modyfikowanego spoiwa.....	112
3.5. Skala wartości normatywnych modułu E ściernic ceramicznych	116
Rozdział 4	
OCENA JAKOŚCI WYKONANIA PARTII ŚCIERNIC	121
4.1. Mierniki jakości wykonania partii wyrobów	122
4.2. Ocena jakości wykonania ściernic producentów krajowych.....	129
4.3. Ocena jakości wykonania ściernic producentów zagranicznych.....	137
4.4. Zastosowanie modułu E do statystycznego sterowania procesem	141

Rozdział 5	
OCENA JAKOŚCI UŻYTKOWEJ ŚCIERNIC.....	146
5.1. System operacyjny do badań jakości użytkowej ściernic	146
5.2. Ocena jakości użytkowej ściernic różnych producentów	152
5.3. Wpływ modułu E na wskaźniki jakości użytkowej ściernic	159
5.4. Wpływ jakości użytkowej ściernic na niezawodność systemu	164
Rozdział 6	
KIERUNKI DOSKONALENIA SYSTEMU OPERACYJNEGO	174
6.1. Model doskonalenia systemu.....	174
6.2. Doskonalenie systemu operacyjnego przez selekcję ściernic	179
6.3. Doskonalenie systemu przez zmianę charakterystyki ściernic	183
6.4. Doskonalenie systemu przez zmianę parametrów obróbki.....	191
PODSUMOWANIE.....	196
SYSTEMOWA OCENA JAKOŚCI ŚCIERNIC CERAMICZNYCH.....	200
SYSTEM EVALUATION OF CERAMIC GRINDING-WHEEL QUALITY	201
BIBLIOGRAFIA	203

WPROWADZENIE

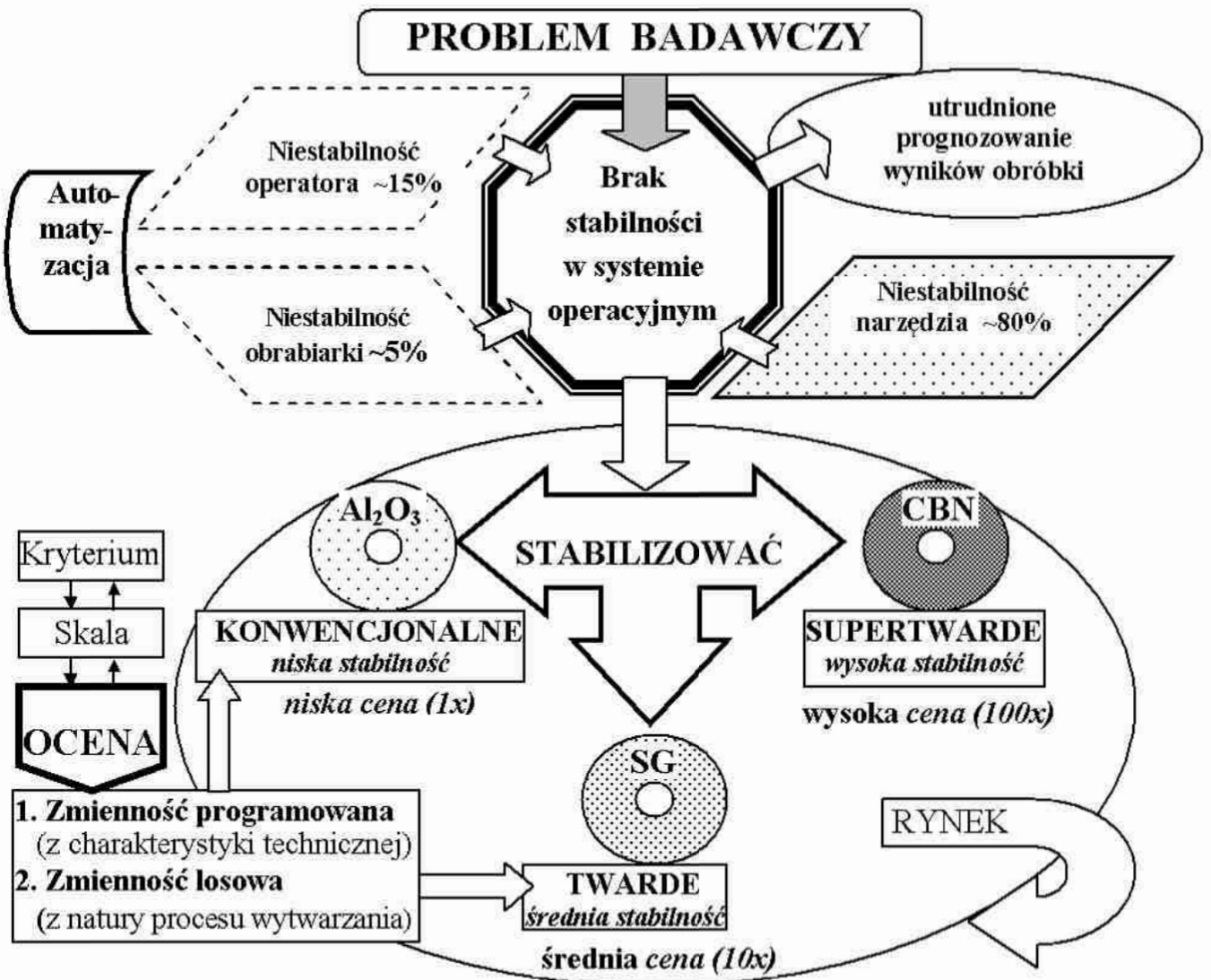
W ostatnich latach obserwuje się szybko postępujący proces mechanizacji i automatyzacji urządzeń produkcyjnych. Jest to możliwe dzięki osiągnięciom elektroniki i informatyki, wymuszone jest natomiast przez globalizację rynków wytwarzania. Obrabiarki i systemy produkcyjne stają się coraz bardziej złożone, a stawiane przed nimi zadania produkcyjne coraz trudniejsze. Niezwykle ważne staje się zatem zagadnienie niezawodności tych urządzeń, każda bowiem nieprzewidziana przerwa w pracy staje się powodem zmniejszenia produktywności takich systemów i wzrostu kosztów wytwarzania. Z drugiej strony na globalnym rynku występuje tendencja do zwiększania użyteczności produkowanych wyrobów, przez uwzględnianie indywidualnych wymagań nabywców. Spełnienie tych wymagań ma w efekcie zagwarantować wytworzenie wyrobu na odpowiednim poziomie jakościowym. Wymagania odnoszą się do wszystkich faz cyklu życia wyrobu, dlatego przyjmuje się, że do wszystkich analiz związanych z jakością nieodzowne jest podejście procesowe (*PN-EN ISO 9000. Systemy zarządzania jakością. Podstawy i terminologia. PKN, Warszawa, wrzesień 2001*). Przesłanka ta była zatem punktem wyjścia przy realizacji przedstawianej pracy, dotyczącej systemowej oceny jakości ściernic ceramicznych.

Od wieków ludzie zastanawiali się, co zrobić, aby podnieść jakość wytwarzanych przez siebie wyrobów. Kiedyś było to wynikiem umiejętności mistrza w danym rzemiośle, współcześnie (w przemysłowych procesach realizacji) jest to wynikiem odpowiedniej organizacji systemu wytwarzania. Zarówno w jednym, jak i drugim przypadku, to, co zostało wytworzone, wymaga oceny dającej świadectwo prawdzie: jakie to jest? Kontrola wyrobów w celu wyeliminowania wadliwych egzemplarzy jest jednak długotrwała i kosztowna. Lepszym rozwiązaniem jest kontrola stabilności procesu i wykorzystywanie uzyskanych informacji do wprowadzania usprawnień doskonalących system. System zaś jest to: „wszelki skoordynowany wewnętrznie i wykazujący określoną strukturę układ elementów”. Zgodnie z cytowaną normą, o systemie jakości możemy mówić wtedy, gdy istnieją cztery elementy:

1. Zamiary (planowany stan docelowy),
2. Warunki (środki realizacji celu),
3. Metody (procedury postępowania),
4. Zastosowanie (wdrożenia pomiarów i istnienie sprzężenia zwrotnego).

Nieodzowne było więc uwzględnienie tych elementów w strukturze realizowanej pracy, związanej z systemami operacyjnymi obróbki szlifowaniem. Systemy te na ogół charakteryzują się niską stabilnością. Dominującą przyczyną takiego

stanu jest niejednorodność narzędzia ściernego. Wpływa to ujemnie na jakość wyrobów i utrudnia jej prognozowanie. Z zagadnieniem tym wiąże się podjęty problem badawczy – rys. 1.



Rys. 1. Problem badawczy w ujęciu systemowym

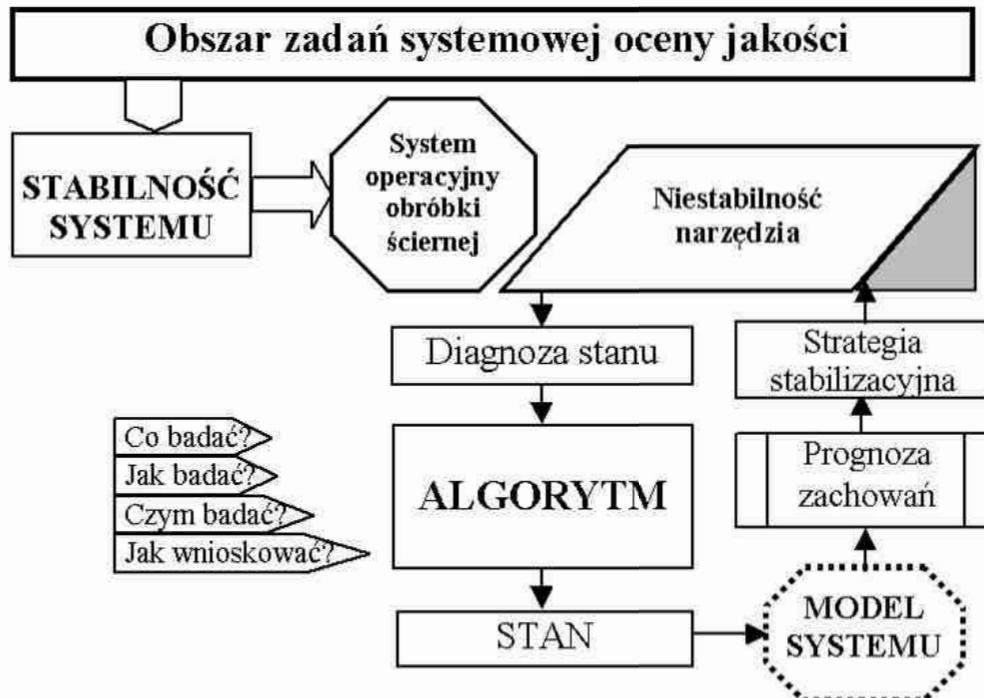
Fig. 1. Research problem in system terms

Jeżeli przyjąć, że niestabilność obrabiarki i operatora z dobrym skutkiem można zminimalizować przez automatyzację, to problem stabilności systemu operacyjnego dotyczy w istocie utrzymania na określonym poziomie założonych właściwości użytkowych narzędzia ściernego. Jest to dosyć trudne w przypadku konwencjonalnych narzędzi ściernych. Wymóg ten spełniają z dobrym skutkiem narzędzia z regularnego azotku boru (CBN), jednak ich pełniejsze wykorzystywanie jest nadal jeszcze ograniczone wysoką ceną (przeciętnie są około 100 razy droższe od analogicznych narzędzi ściernych o konwencjonalnej budowie).

Alternatywą dla supertwardych ściernic z CBN mogą być „twarde” ściernice z mikrokryształicznego korundu spiekanego (SG). Wynika to przede wszystkim

kim ze zdecydowanie niższej ceny tych narzędzi oraz mniejszych wymagań procesowych; ich użytkowanie może się bowiem odbywać w warunkach i na zasadach dotyczących ściernic konwencjonalnych.

Niezależnie od tych innowacyjnych osiągnięć w zakresie konstrukcji narzędzi ściernych, nadal mają szerokie zastosowanie i jeszcze przez długi czas będą miały ściernice o konwencjonalnej budowie. Wynika to co najmniej z trzech aspektów: niskiej ceny, dużego doświadczenia w ich użytkowaniu oraz przyzwyczajenia (inercji myślowej) człowieka. Dlatego też firmy produkujące tego typu narzędzia ciągle się rozwijają i wzrasta wolumen ich sprzedaży. Szacuje się, że w tej produkcji zdecydowanie największy udział zajmują ściernice (około 40%). W większości przypadków są to ściernice wykonane na bazie spoiwa ceramicznego (ze względu na jego dobre właściwości użytkowe, opanowany proces wytwarzania narzędzi oraz możliwość szerokiej regulacji budowy strukturalnej). Dlatego zagadnienie oceny jakości tego typu narzędzi ściernych, w celu ich dalszego doskonalenia, należy uznać za aktualne. Biorąc jednak pod uwagę postulat Blancharda, który stwierdził, że: „w wieku systemów optymalne osiągnięcie celów technicznych wymaga kombinacji wiedzy systemowej i szerokiego podejścia ekspertowego”, obszar zadań takiej oceny sprowadza się do całego kompleksu działań, związanych ze stabilnością systemu operacyjnego – rys. 2.



Rys. 2. Zadania oceny jakościowej narzędzi ściernych
Fig. 2. Tasks of abrasive tool system quality assessment

Każda ocena wymaga odpowiedniej skali i kryteriów. Najwłaściwsze są kryteria wymierne, oparte na pomiarach. Ocena jest bowiem na tyle „słuszna”, na ile „słuszne” jest zastosowane kryterium. Z wielu prac badawczych autora

i innych badaczy wynika, że za takie wymierne kryterium oceny jakościowej ściernic może być przyjęty moduł sprężystości wzdłużnej E .

Nie zostały jednak dostatecznie zbadane zagadnienia szczegółowe, związane z tym parametrem. Zbiór tych zagadnień utworzył obszar problemów badawczych rozważanych w niniejszej pracy. Najważniejsze z nich to:

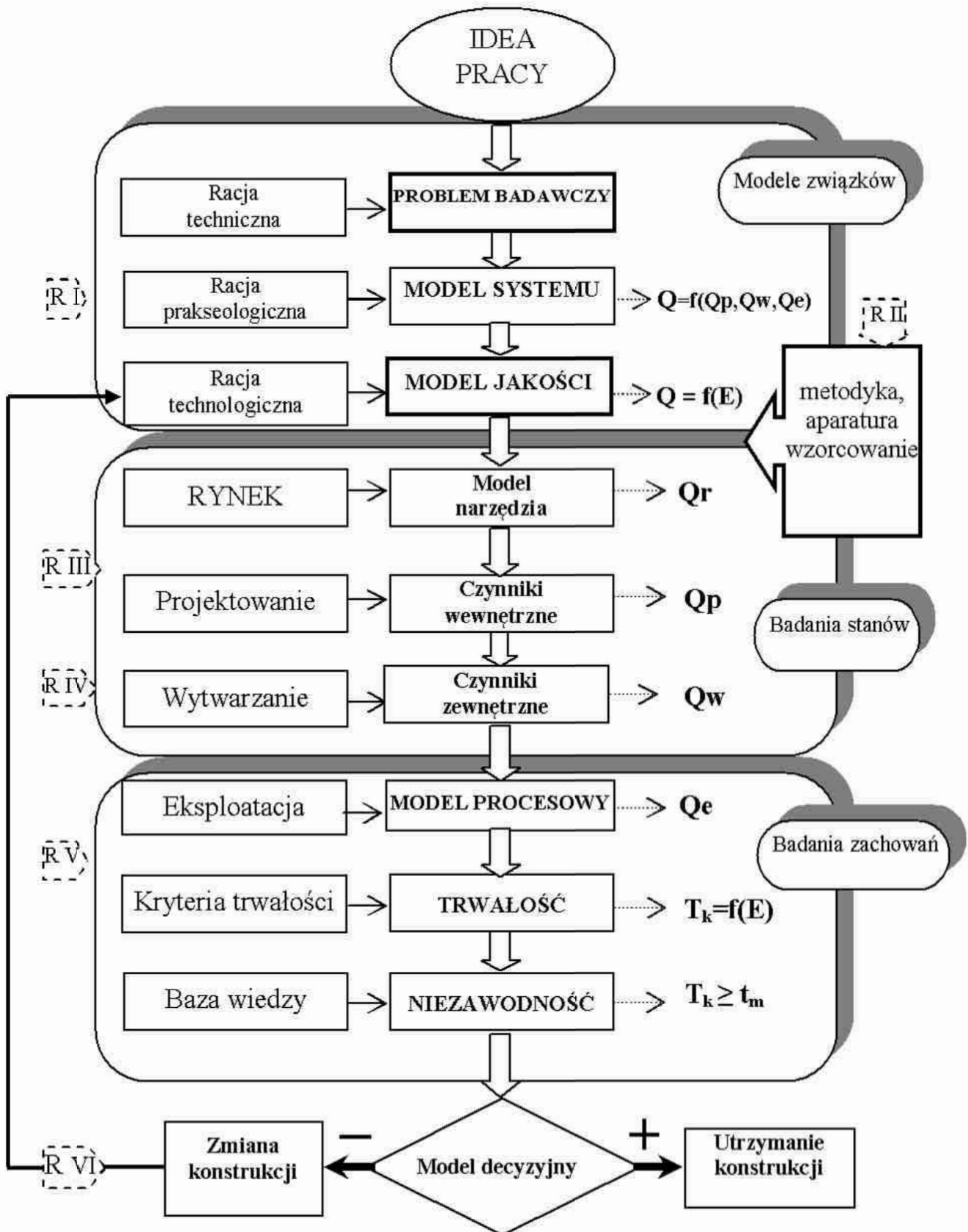
- Jaki jest związek modułu E z parametrami opisującymi charakterystykę techniczną ściernic ceramicznych?
- Jaki jest związek modułu E z procesem wytwarzania ściernic?
- Jaki jest związek modułu E z właściwościami eksploatacyjnymi ściernic?
- Czy można zaprojektować ściernicę o określonej wartości modułu E ?
- Czy można wykorzystać moduł E do sterowania procesem wytwarzania narzędzi ściernych?
- Czy można wykorzystać moduł E do sterowania niezawodnością systemu operacyjnego obróbki szlifowaniem?
- O ile zmienia się moduł E przy zmianie rodzaju ścierniwa i spoiwa?
- O ile zmienia się wartość modułu E przy zmianie producenta ściernic?
- O ile zmienia się niezawodność systemu operacyjnego obróbki szlifowaniem przy zastosowaniu ściernic o kontrolowanych według modułu E cechach budowy?

Odpowiedzi na te i inne zagadnienia wymagały nowego (kompleksowego) podejścia do analizowanych narzędzi ściernych, wychodzącego z istoty ich pracy i powiązań procesowych. Podejście to, należące do Inżynierii Systemów, pozwoliło analizować jakość ściernic jako „wielowymiarowość tej samej rzeczy”. Uzyskano w ten sposób spójny obraz badanego zagadnienia w ujęciu procesowym. Na obraz ten składają się wyniki badań zawarte w trzech podstawowych modułach: *modeli, stanów i zachowań*, uzupełnionych o dwa moduły dodatkowe: *metodyki badań i działań doskonalących system* (rys. 3). Moduły te zawierają oddzielne zagadnienia, zintegrowane jednak ze sobą przez ideę badawczą, dotyczącą wykorzystania modułu E do ilościowej oceny jakości.

W rozdziale 1 podjęto próbę połączenia różnych zagadnień w jedną całość i wyjaśniania faktów przy przyjęciu niewielkiej liczby założeń dotyczących systemu (cel istnienia, cechy inherentne, cechy przypisane).

W rozdziale 2 omówiono technikę pomiarową, jakiej użyto w celu określenia wartości przyjętego kryterium pomiarowego. Specyfika obiektu badań wymagała opracowania trzech odrębnych metod pomiaru (niskiej, średniej i wysokiej częstotliwości), opartych jednak na tej samej idei i kryterium pomiarowym. W rozdziałach 3, 4, 5, przedstawiono dane, jakie otrzymano przy użyciu zastosowanej techniki pomiarowej, niezbędne do określenia związków korelacyjnych pomiędzy para-

metrami na wejściu i wyjściu z procesu. Rozdział 6 dotyczy strategii postępowania w celu uzyskania większej jakości użytkowej rozpatrywanych narzędzi ściernych.



Rys. 3. Struktura pracy w ujęciu procesowym
Fig. 3. Work structure in process terms

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- AQL – akceptowany poziom jakości
- a_e – szerokość styku roboczego
- a_p – szerokość styku wgłębnego
- C_l – prędkość fali podłużnej
- C_{lu} – prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych
- C_p – wskaźnik zdolności jakościowej procesu
- D – średnica zewnętrzna ściernicy
- D_u – umowny wzorzec jakości
- d_z – przeciętny wymiar charakterystyczny ziarna ściernego
- E – dynamiczny moduł sprężystości wzdłużnej (Younga) ściernicy
- E_z – moduł Younga ścierniwa
- E_s – moduł Younga spoiwa
- E_{zs} – moduł Younga faz materialnych ściernicy
- E_{xt} – operator ekstremum
- F_c – funkcja kryterialna
- F_p – składowa odporowa siły skrawania
- F_{ps} – składowa odporowa siły skrawania przypadająca na jedno ziarno
- f – częstotliwość drgań własnych ściernicy
- f_n – częstotliwość drgań własnych ściernicy (określonej postaci)
- G – wskaźnik szlifowania
- H – średnica otworu ściernicy
- J^* – funkcja optimum dla systemu
- J_i^* – funkcja optimum dla członów systemu
- K_z – koszty jednostkowe operacji przy postępującym tępieniu się ściernicy
- K'_z – koszty jednostkowe operacji przy dobrym samoostrzeniu się ściernicy
- k – współczynnik kształtu ściernicy
- l_{FH} – droga ruchu posuwowego stołu
- m – masa ściernicy
- N – rozkład normalny zmiennej losowej
- N_s – numer struktury ściernicy
- N_z – numer ziarna ściernego
- n – liczba pomiarów
- P_c – maksymalna moc skrawania
- Q – jakość wyrobu
- Q_e – jakość użytkowa (eksploatacyjna)
- Q_{ISO} – systemowy (syntetyczny) wskaźnik jakości wyrobu (procesu)
- Q'_{ISO} – grupowy wskaźnik jakości partii wyrobów
- Q_p – jakość projektowa (typu)

- Q_r – jakość rynkowa
 Q_s – zużycie ściernicy
 Q_w – jakość wykonania (zgodności)
 q – naddatek na obróbkę
 R – promień zewnętrzny ściernicy
 R – współczynnik korelacji wielowymiarowej
 Ra – chropowatość powierzchni szlifowanej
 R_{ch} – rozstęp modułu E, wynikający z różnorodnych cech budowy ściernicy
 R_p – rozstęp modułu Younga, wynikający z zakłóceń produkcyjnych
 R – niezawodność
 $R(t_m)$ – niezawodność operacyjna systemu
 $R(T_k)$ – niezawodność systemu ze względu na trwałość kryterialną ściernicy
 r – współczynnik korelacji Pearsona
 \underline{SN} – ogólna notacja struktury systemu narzędziowego
 \underline{SO} – ogólna notacja struktury systemu operacyjnego
 \underline{SR} – ogólna notacja struktury systemu rynkowego
 \underline{SW} – ogólna notacja struktury systemu wytwarzania
 \underline{SZ} – ogólna notacja struktury systemu elementarnego
 SPC – statystyczne sterowanie procesem
 V_s – udział objętościowy spoiwa w ściernicy
 V_{sg} – procentowa zawartość ziaren SG w masie ściernicy
 V_p – udział objętościowy por w ściernicy
 V_z – udział objętościowy ziaren ściernych w ściernicy
 v_{ft} – posuw styczny stołu
 v_s – prędkość obwodowa ściernicy
 T – wysokość ściernicy
 T – okres trwałości ściernicy
 T – tolerancja normatywna badanego parametru
 T_k – okres trwałości ze względu na określone kryterium
 t_m – czas maszynowy operacji
 W – wynik działania
 W_o – wydajność produkcyjna
 z – stopień zgodności (ogólna miara jakości)
 Δ_{rs} – zużycie promieniowe ściernicy
 ρ – gęstość ściernicy
 σ_n – odchylenie standardowe dla próbki
 σ_{n-l} – odchylenie standardowe dla populacji
 σ_E – odchylenie standardowe wartości średniej modułu E
 φ_n – ciąg stopniowania twardości ściernicy ceramicznej
 φ_s – ciąg stopniowania struktury ściernicy ceramicznej

ROZDZIAŁ 1

MODELE SYSTEMOWE OBIEKTU BADAŃ

Systemowe podejście do oceny zdatności użytkowej (kwantyfikowania jakości) narzędzi ściernych wymaga działania analitycznego, opartego na założeniu, że wszystkie zjawiska bada się kompleksowo. Modele systemowe mogą być pomocne przy analizie określonego zagadnienia badawczego, ponieważ opisują charakter istotnej w danej chwili części systemu.

Modele ocenowe powinny ułatwić odpowiedź na pytanie: z jaką dokładnością i czym należy sterować, jakie zmienne mogą i powinny być zmiennymi decyzyjnymi systemu oraz jakiego rzędu efektów oczekiwać się powinno w przypadku optymalizacji określonych decyzji [2]. Podstawową przesłanką takiego podejścia jest uznanie narzędzia ściernego za system (otwarty), który uzależnia wynik pracy od wpływu zmieniających się warunków otoczenia. Praca nad tworzeniem systemu oceniania jakościowego wymaga refleksji nad istotą systemu, bowiem w przypadku braku zrozumienia istoty podejścia systemowego zamiast optymalnych działań wystąpić bowiem mogą działania suboptymalizacyjne [74].

1.1. Podejście systemowe jako metoda badawcza

W podejściu badawczym, system jest metodologicznym modelem złożonego układu działania z wyraźnie określonym celem. Twórca teorii systemów L.von Bertalanffy zdefiniował system jako: zbiór elementów, pozostających we wzajemnym oddziaływaniu między sobą oraz otoczeniem [5]. W technice nurt systemowy znalazł swoją kulminację szczególnie w zakresie kompleksowego zarządzania jakością (TQM) [31].

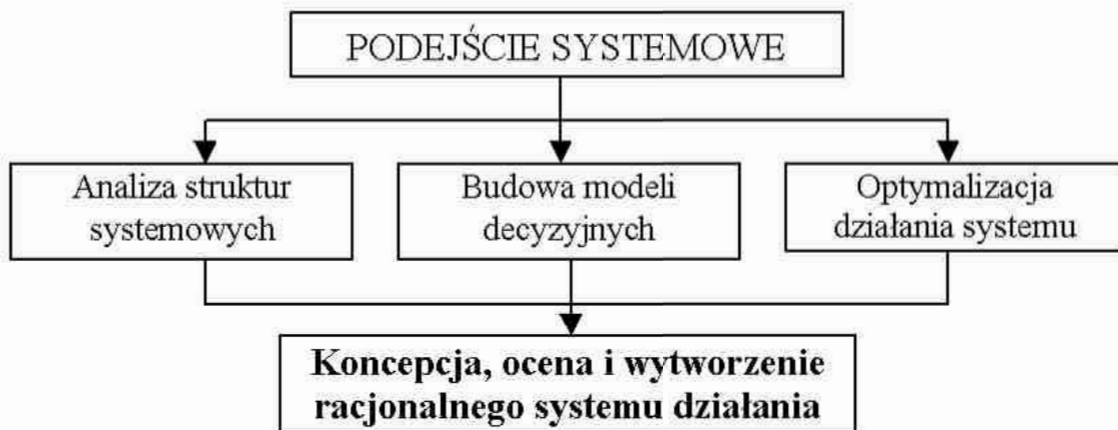
W systemach na plan pierwszy wysuwają się prawa i pojęcia ogólne, bowiem poszukuje się takich podobieństw (homologii), które są uniwersalne i dają się przenieść z jednej dziedziny wiedzy w drugą. Tego typu działanie wymaga nowej postawy myślowej, zwanej „myśleniem systemowym”. Myśleć systemowo, to uwzględniać kontekst (po co to?), zakładając przy tym, że jest on zmienny, złożony i uporządkowany (czyli systemowy), i tak naprawdę to nie wiadomo, gdzie się zaczyna i gdzie się kończy [89]. Postępowanie wykorzystujące ten rodzaj myślenia określane jest jako systemowy punkt widzenia albo podejście systemowe. G. Ossimitz podejście to definiuje następująco [103]:

- myślenie modelami i zdolność do ich budowania,
- myślenie w kategoriach sprzężeń zwrotnych,

- myślenie dynamiczne,
- umiejętność sterowania systemami.

Przewodnią myślą tego podejścia jest racjonalność i optymalne osiąganie celów [30]. Myśląc systemowo należy zawsze nawiązywać do własności systemu jako całości, do jego struktury oraz do jego funkcji i ewolucji [111].

Ujęcie systemowe w najszerszym znaczeniu może oznaczać więc podejście badawcze przeciwstawne paradygmatowi Newtonowskiemu, który kazał postrzegać badane obiekty jako zbiory autonomicznych części [62]. Obejmuje trzy kierunki działań, mających za zadanie dostarczenie praktycznych metod i technik tworzenia koncepcji, oceny i realizacji zorganizowanych tworów zwanych systemami [75]. Kierunki te pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Kierunki działań podejścia systemowego

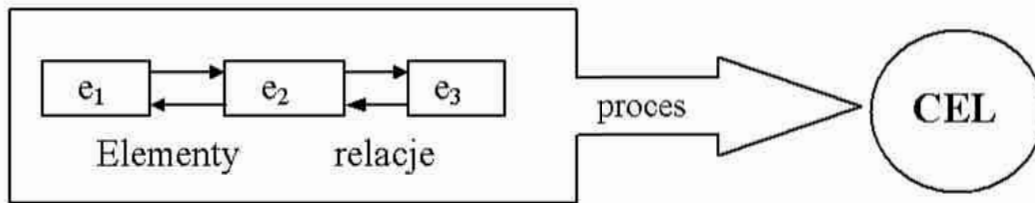
Fig. 4. Lines of activity in system approach

Istotą systemu jest więc racjonalne powiązanie elementów z punktu widzenia procesu działania. Założenia metodyczne kształtowania złożonych, ale jednocześnie racjonalnych systemów działania, opierają się na trzech postulatach [76]:

1. zastosowanie badań i doświadczeń w celu możliwie dokładnego ustalenia faktów związanych z działaniem,
2. zastąpienie warunków i czynników nieznanymi, niestabilizowanymi, czynnikami w miarę możliwości ściśle określonymi i znormalizowanymi,
3. kontrolowanie bieżące procesu, mające na celu wczesne ujawnienie rozbieżności pomiędzy stanami rzeczywistymi a zamierzonymi.

Podstawą do systemowego ujęcia zagadnienia jest więc określenie elementów (członów) wchodzących w skład systemu, relacji wiążących te elementy, obiektów należących do otoczenia oraz relacji wiążących system i otoczenie. Sposób określenia obiektów i relacji zależy przede wszystkim od zadań stawianych systemom i metod pozwalających je zrealizować [79].

Aby coś nazwać systemem, muszą być wyróżnione co najmniej trzy elementy (człony) współdziałające dla osiągnięcia określonego skutku, zwanego celem, przy czym cel jest to stan, który zasługuje na to, aby być osiągnięty rys. 5.



Rys. 5. Model systemu

Fig. 5. System model

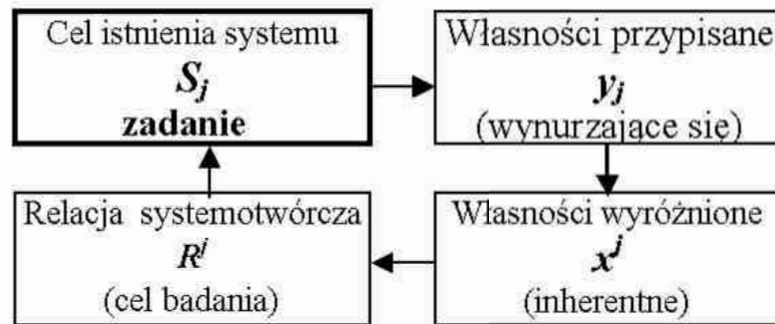
Technika systemowa opiera się na pewnych założeniach, wśród których wyróżnia się założenia ogólne i szczegółowe. Założenia ogólne wymagają odpowiedniej hierarchizacji elementów w strukturze systemu oraz podejścia do całości na zasadzie „czarnej skrzynki”. Założenia szczegółowe wymagają natomiast wyraźnego zdefiniowania celów systemu, opisywania zależności w systemie za pomocą reguł matematycznych oraz takiego podziału systemu na elementy, aby można je było analizować (razem, bądź osobno) za pomocą modeli symulacyjnych w funkcji: czasu, celów lub wariantowości [70].

O sposobie funkcjonowania samego systemu decydują wyróżnione (inherentne) własności x^j jego elementów oraz relacje wzajemnego oddziaływania pomiędzy nimi. [17]. Zbiór x^j jest przy tym podzbiorem zbioru x wszystkich własności elementów systemu $x^j \subset x$. Z tego wynika, że na badanym obiekcie można zdefiniować $j = 1, \dots, m$ systemów [146].

Istnienie zbioru obiektów (elementów) jest warunkiem koniecznym, lecz niewystarczającym do powstania systemu. Do tego niezbędne jest wprowadzenie trzeciej kategorii przedmiotów – cechy. Stanowi ją ta własność lub własności y_j , które wynikają z przyjętego zadania i celu badania obiektu. Własności te są przypisane do tego systemu (wynurzają się z niego) i nie mają sensu w odniesieniu do elementów [144]. Z powiązania ich z własnościami inherentnymi systemu x^j , powstaje relacja systemotwórcza R^j , która jest podstawą budowy systemu S_j . Własności wyróżnione x^j i relacje R^j zależą od stanu otoczenia Ot . Każdy analizowany system znajduje się bowiem w jakimś otoczeniu, które oddziałuje na niego dwoma zbiorami sygnałów: wymuszeniami $u = \{u_1, \dots, u_n\}$ i zakłóceniami $z = \{z_1, \dots, z_m\}$. Te pierwsze są zazwyczaj celowo wytwarzane przez inne systemy sztuczne i są znane. Te drugie natomiast nie są znane i mogą być co najwyżej szacowane i przedstawiane jako procesy losowe. Stąd stan otoczenia Ot jest wektorem, a sam system S_j definiuje się jako uporządkowaną trójkę [146]:

$$S_j = \langle x^j, R^j, Ot \rangle \quad (1)$$

Powiązanie metodologiczne pomiędzy tymi pojęciami zobrazowano na rys. 6.

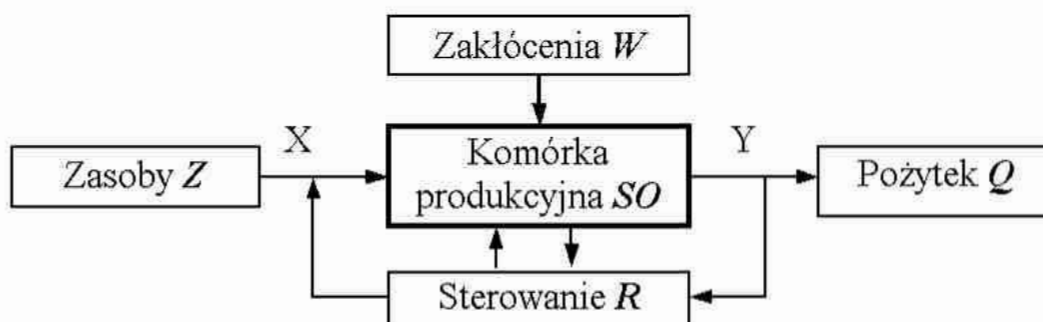


Rys. 6. Model postępowania metodologicznego w systemie

Fig. 6. Model of methodological procedure in system

Ponieważ wszystkie te składniki definicyjne systemu są abstraktami, to system też jest abstraktem, czyli utworem myślowym, zbudowanym w celu modelowania fizycznego lub matematycznego danego obiektu materialnego. System S_j jest własnością tego obiektu, ponieważ opisuje jego jedną konkretną własność j . Modele systemowe tworzone są więc dla konkretnego (jednego) systemu S_j , a nie dla tego obiektu. Na jednym obiekcie można zdefiniować wiele różnych systemów S_1, S_2, \dots, S_m [146].

Podstawowym celem budowy systemów jest nadanie racjonalności i produktywności procesowi działania [75]. System bowiem to specyficzny instrument organizacji procesu, który ma obrócić siły swoich elementów w osiągnięciu określonego efektu użytkowego, minimalizując, a po większej części unieszkodliwiając, zakłócenia oddziałujące na jakąś jednostkę działania (komórkę) procesu. Komórka produkcyjna (SO) jest systemem otwartym, łączącym się z otoczeniem za pomocą wejść X oraz wyjść Y – rys. 7.



Rys. 7. Model przedsięwzięcia procesowego jako systemu

Fig. 7. Model of process undertaking in terms of system

W komórce następują operacje przekształcania zasobów Z w pożytek Q . Przekształcenia te są procesem sterowanym przy użyciu regulatora R . W otoczeniu bowiem występują zakłócenia W , działające negatywnie na przebieg tego procesu. Regulacja procesu odbywa się przez sprzężenie funkcjonalne wejścia i wyjścia $Y=f(X)$. Aby było to możliwe, konieczne jest [70]:

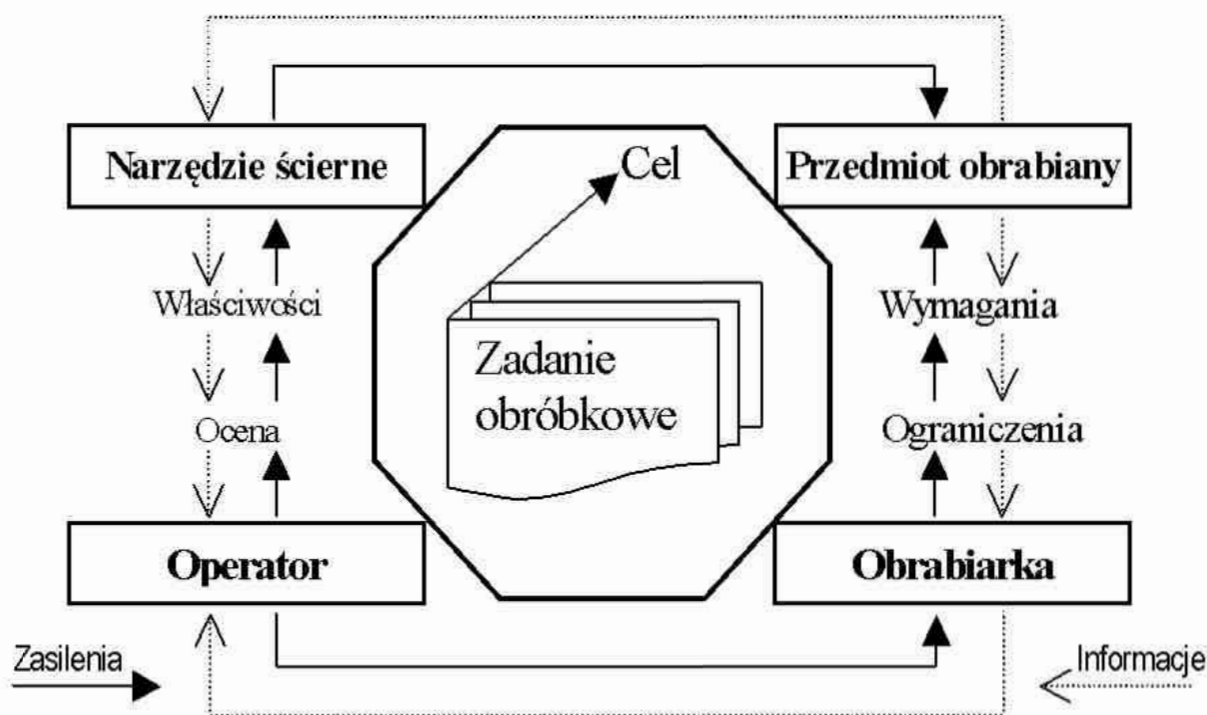
1. monitorowanie określonych parametrów na wejściu i wyjściu z procesu,
2. istnienie w systemie układu regulacyjnego R .

Dzięki monitorowaniu możliwe jest dostatecznie wczesne wykrycie nieprawidłowego funkcjonowania komórki produkcyjnej oraz określenie charakteru i intensywności zmian prowadzących do utraty pożytku Q . Monitorowanie stwarza jednak tylko warunki do uniknięcia niepożądanych wyników. Cybernetyka przyjmuje, że w zasadzie sterowalnymi są tylko procesy mierzalne, a więc takie, których monitorowane parametry są liczbowe [118].

Warunkiem niezbędnym do dozoru systemu, a więc i do zapobiegania procesom degradacyjnym, jest pomiar parametrów (na wejściu i na wyjściu z procesu). Drugim nieodzownym warunkiem każdego systemu jest zatem układ regulacyjny R , który działa na zasadzie sprzężeń zwrotnych, a jego istotą jest stabilizacja zadanych wielkości [62]. Regulatorem systemu może być człowiek (C) lub automat (A). Z perspektywy systemowej człowiek nie stoi więc poza sprzężeniem zwrotnym, ale jest jego elementem [117].

Jeden z podstawowych postulatów podejścia systemowego nakazuje zatem by badany obiekt (ujmowany jako system) z jednej strony rozpatrywać w relacji do jego (zmieniającego się) otoczenia, z drugiej strony – by poszukiwać sprzężeń (relacji funkcjonalnych) między jego elementami, ujmowanymi jako systemy niższego rzędu. Relacje wiążące elementy w systemie mogą być określane w różny sposób: jako proste parametry (np. czasy obróbki dla procesu produkcyjnego), lub równania matematyczne opisujące działanie systemu. Relacje te mogą być zdeterminowane lub probabilistyczne [115]. Jeżeli rezygnuje się ze ścisłego modelu matematycznego, wykorzystując tylko opisy korelacyjno-graficzne, to takie modelowanie określa się jako „miękkie” [13]. Dotyczy ono problemów słabo ustrukturalizowanych, złożonych, związanych z niepewnością i niepełnością informacji. Przy tego typu modelowaniu odwzorowuje się strukturę systemu za pomocą sieci powiązań przyczynowo skutkowych. Najważniejszymi elementami w tym odwzorowaniu są linie ze strzałkami. Te zgrubnie naszkicowane modele są następnie analizowane pod kątem działań celowych.

Procesy obróbki ścierniej z natury swej są losowe, a więc do tego typu zagadnień najlepiej nadaje się „miękką” technika systemowa [136]. Przykład takiego modelowania w odniesieniu do systemu operacyjnego obróbki ścierniej pokazano na rys. 8.

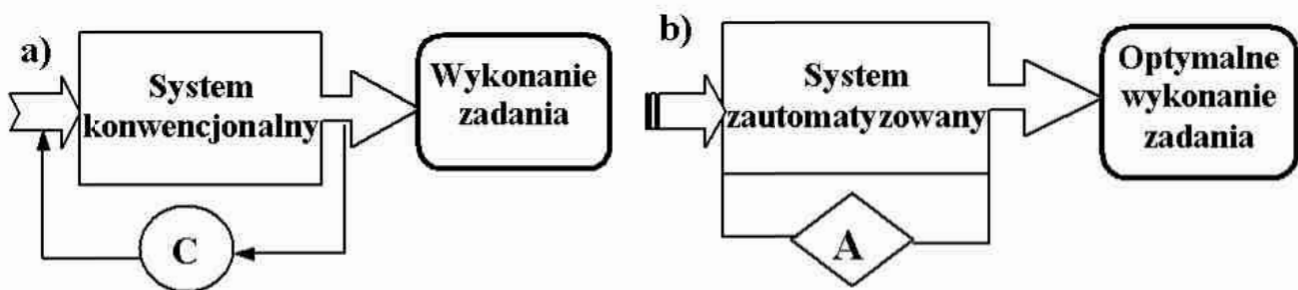


Rys. 8. Model systemu operacyjnego obróbki ścierniej w miękkiej technice odwzorowania
Fig. 8. Operating system model of abrasive machining in soft mapping technique

System operacyjny obróbki ścierniej tworzy pewną całość zorganizowaną zadaniowo. Do systemu wchodzi zasilenia (energetyczne i informacyjne), a uzyskiwany jest efekt użytkowy stanowiący cel działania. Pod pojęciem efektu rozumie się jakikolwiek rezultat na przedmiocie obrabianym. W zakresie wykańczającej obróbki ścierniej jest nim zwykle uzyskanie odpowiednich przekształceń w stereometrii warstwy wierzchniej przedmiotu, lub usunięcie określonego naddatku – jeżeli jest to obróbka wydajnościowa. Proces obróbki przebiega dzięki współpracy podsystemów (rys. 8) nazywanych elementami (członami) systemu. Zakłócenia w pracy jednego z podsystemów wpływają na zakłócenia całego systemu, dlatego też wymaga on odpowiedniego sterowania [21]. Czynności sterujące w systemie operacyjnym podejmuje operator, którym może być człowiek lub komputer. Elementem wykonawczym jest narzędzie ściernie, którego sposób pracy wymuszony jest przez obrabiarkę. Po to, by zachowywało się ono w odpowiedni sposób, trzeba nim sterować, czyli zmuszać do ruchu według pewnych prawideł. Działanie systemu operacyjnego może być oparte na zasadzie zamkniętego obwodu sterowania, co oznacza, że występuje w nim bieżąca kontrola stanu technicznego narzędzia i odpowiednia do tego samoregulacja układu przez serwomechanizm. Przy braku takiego członu regulacyjnego, efekty działania systemu zależą w sposób istotny od intensywności zmian trwałości narzędzia [1].

1.2. Stosunki organizacyjne systemów produkcyjnych

Stosunki organizacyjne systemów produkcyjnych możemy rozpatrywać z dwójakiego punktu widzenia: statycznego i kinetycznego. Powiązania statyczne to podukład zakresów działania (funkcji, czynności, grupowania) wraz z koordynacją wzajemną elementów. Przez związki kinetyczne rozumie się natomiast wszelkiego rodzaju podukłady przebiegów działań oraz ich zharmonizowanie wzajemne w czasie i przestrzeni. Struktura systemu daje jego obraz w ujęciu statycznym. Z chwilą, gdy na wejściu do systemu zostają wprowadzone informacje sterujące oraz zasilenia materiałowe, następują procesy realizacyjne i przechodzi on w stan dynamiczny. Procesy realizacyjne systemów produkcyjnych odbywają się w sposób wymuszony. Wymuszenie to następuje przez sterowanie, czyli świadomą ingerencję człowieka, zwykle za pomocą określonych urządzeń. Jeżeli proces sterowania odbywa się przy uzbrojeniu maszyny i urządzenia, które pod kierunkiem człowieka potrafią wykonywać samodzielnie poszczególne czynności – poza sterowaniem ich przebiegiem – określa się go jako zmechanizowany. Jeżeli mechanizacja obejmuje choć część czynności sterowania, rozpoczyna się automatyzacja procesu [75]. Zatem system operacyjny jest sterowany albo bezpośrednio przez operatora (*C*), albo przez automat (*A*) – rys. 9.



Rys. 9. Cele systemów: a) konwencjonalnego, b) zautomatyzowanego

Fig. 9. System targets: a) conventional, b) automated

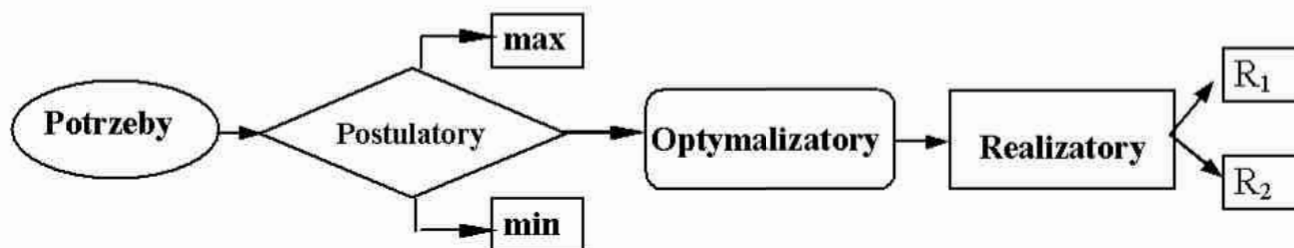
Współcześnie także i w obróbce ścierniej istnieje wyraźna tendencja do zastępowania człowieka (operatora systemu) specjalnym oprogramowaniem i nadzorem przez komputer. Naciski na takie rozwiązania innowacyjne mają swoje źródło w globalnym dążeniu do zwiększania produktywności, dokładności i ekonomiczności procesów wytwarzania [100]. Biorąc to pod uwagę można dokonać istotnego (dla niniejszej pracy) podziału systemów operacyjnych obróbki ścierniej na: konwencjonalne (sterowane przez człowieka) oraz zautomatyzowane (sterowane przez automat).

Przyjęcie takiego podziału pozwala uwypuklić cele stawiane przed danym systemem. Celem członu sterującego *A* lub *C* jest stabilizacja działania systemu. Wynik działania jest jednak różny w zależności od tego, jakimi sposobami się

to uzyskuje. Do optymalnego wykonania zadania potrzebna jest bowiem niezawodność systemu, tj. ograniczenie do możliwego minimum prawdopodobieństwa niezrealizowania przez którykolwiek element transformacji zasilen lub informacji. Ściśle biorąc o optymalizacji w praktycznym sensie można mówić dopiero w warunkach stabilności produkcji, kiedy harmonogram produkcji zostanie zamknięty w cykl powtarzalności [79]. Stabilność taką zapewnia jedynie produkcja zaautoamatyzowana, eliminująca z systemu działania człowieka. Wszystkie systemy z udziałem człowieka (antropotechniczne) mają charakter probabilistyczny (losowy) [76]. W tym kontekście podstawowym celem automatyzacji jest sprowadzanie układu probabilistycznego, czyli o skutkach tylko prawdopodobnych, do możliwie prostego układu zdeterminowanego, a więc o zachowaniach dających się przewidzieć i algorytmizować. Sterowanie systemem operacyjnym w kierunku uzyskiwania optymalnych wartości jest działalnością z zakresu rozwiązywania problemów. Metodologicznie rzecz biorąc, problemów decyzyjnych są tylko trzy rodzaje [84].

- *postulacja* – działalność decyzyjna, polegająca na wskazywaniu celów do osiągnięcia, czyli „co osiągnąć” – docelowo: „taki stan”,
- *optymalizacja* – działalność decyzyjna, polegająca na wskazywaniu sposobów, metod, czyli „jak osiągnąć?” – „taką transformacją”,
- *realizacja* – działalność decyzyjna, polegająca na wskazywaniu zasobów, czyli „z czego osiągnąć?” – „z takiego systemu”.

Model powiązań między tymi pojęciami zobrazowano na rys. 10.



Rys. 10. Model postępowania optymalizacyjnego

Fig. 10. Model of optimization procedure

Istotą optymalizacji jest pokazanie jaką transformacją wielkości optymalizowanych (optymalizatorów) w systemie można osiągnąć postulat racjonalności działania. Zasady postępowania w zakresie racjonalnego działania określa prakseologia. Według T. Kotarbińskiego, twórcy tej nauki, maksymalizacja racjonalnego wykorzystania środków oznacza najczęściej minimalizację kosztów produkcji lub maksymalizację wydajności [71]. W przypadku ogólnym nie jest możliwe spełnienie więcej niż jednego kryterium optymalizacji. Zwykle więc postępuje się w ten sposób, że przy danym nakładzie środków dąży się do mak-

symalizacji celu, lub przy założonym z góry stopniu realizacji celu minimalizuje nakład środków.

Proces obróbki ścierniej charakteryzuje się znaczną różnorodnością produkcji, warunków obróbki oraz stosowanych narzędzi ściernych. Optymalizacja takiego procesu jest pojęciem syntezyującym wpływ wielu różnych czynników produkcji. Zakres ich oddziaływania jest różny i zależny od specyfiki procesu. Teoria i praktyka wskazuje jednak, że czynniki te zwykle udaje się sklasyfikować, wyłonić jeden lub kilka czynników dominujących, których wpływ na syntetyczne wskaźniki oceny rozwiązania jest zasadniczy i które decydują w znacznej mierze o wynikach organizacyjnych i ekonomicznych, oraz te czynniki, których znaczenie jest drugorzędne. Określenie dominującego w danych warunkach czynnika jest jednoznaczne z wybraniem elementu, który w procesie projektowania powinien być preferowany i traktowany nadrzędnie. Wybór elementu nadrzędnego znacznie ułatwia proces projektowania i optymalizacji, bowiem pozwala w sposób prosty wybrać wariant organizacji wystarczająco korzystny [79]. Od ściernic, jako wyróżnionego członu systemu operacyjnego szlifowania wymaga się [149]:

- jak największej wydajności produkcyjnej,
- dobrych właściwości skrawnych, zarówno przy szlifowaniu bez chłodzenia, jak i z różnymi rodzajami płynów chłodzących,
- długiego okresu trwałości zachowania dobrych właściwości skrawnych
- jednorodności budowy, umożliwiającej powtarzalne właściwości skrawne po obciążaniu,
- łatwości określenia rozrzutu utraty dobrych właściwości skrawnych,
- łatwości ostrzenia i kształtowania powierzchni czynnej.

Są to postulaty dotyczące strategii działania w każdym procesie realizacyjnym obróbki ścierniej. W systemie obróbki powtarzalnej (zautomatyzowanej) każda strategia jest oceniana przez pryzmat wartości optymalnej (funkcji celu J). Powstaje więc problem ustalenia hierarchii tych strategii na podstawie wartości optymalnych: czy ma być max, czy min? Jest to problem „dominacji strategii”, inaczej mówiąc: ustalenie trendu funkcji celu ($\max J \cap \min J$). Strategia stanowi bowiem pewien wybór parametrów technicznych (zmiennych operacyjnych systemu a, b, c, \dots), który odpowiada pewnemu możliwemu sposobowi działania tego systemu ($J \in a_1, b_3, c_4$).

Ogólnie rzecz biorąc, funkcją celu (funkcją wartości optymalnej) określa się zbiór powiązań ekonomicznych, które łączą różne zmienne operacyjne i zmienne wyjściowe w tę samą strategię. Optymalną wartością strategii nazywa się najwyższą wartość użytkową zgodną z funkcją celu [25].

Funkcja celu J może być kombinacją liniową wielkości wyjściowych y_i , których względne znaczenie wyrażają wagi a_i

$$J = \sum_{i=1}^p a_i y_i \quad (2)$$

Wybór wag a_i nie jest łatwy i określony jest dużym subiektywizmem. Czynniki wynikowe y_i są w ogólnym przypadku wyrażone w różnych jednostkach, a zatem ilościowe ujęcie kompromisu między nimi jest trudne lub wręcz niemożliwe. Z tego względu najczęściej wybiera się jeden czynnik wynikowy, który będzie funkcją celu, na pozostałe zaś nakłada się warunki ograniczające. Postępowanie takie jest konieczne w przypadku eksperymentalnego poszukiwania optimum. Jeżeli ekstremum poszukiwane jest z wykorzystaniem modelu, to za wielkość wyjściową przyjmuje się model matematyczny tej wielkości, na pozostałe natomiast nakłada się warunki ograniczające.

Działania realizowane w systemach, związane z uzyskiwaniem funkcji celu, mogą się odbywać na zasadzie planowania odgórnego, albo „gry” [154]. Zachowanie się systemu może być z góry zaplanowane, jeżeli zależności pomiędzy zmiennymi są zdeterminowane. Postępowanie elementów jest całkowicie kontrolowane przez człon sterujący. W systemie nie występują optima lokalne J_i , bowiem wykonuje on zaplanowany z góry program, który prowadzi do uzyskania optymalnego stanu J^* dla całości.

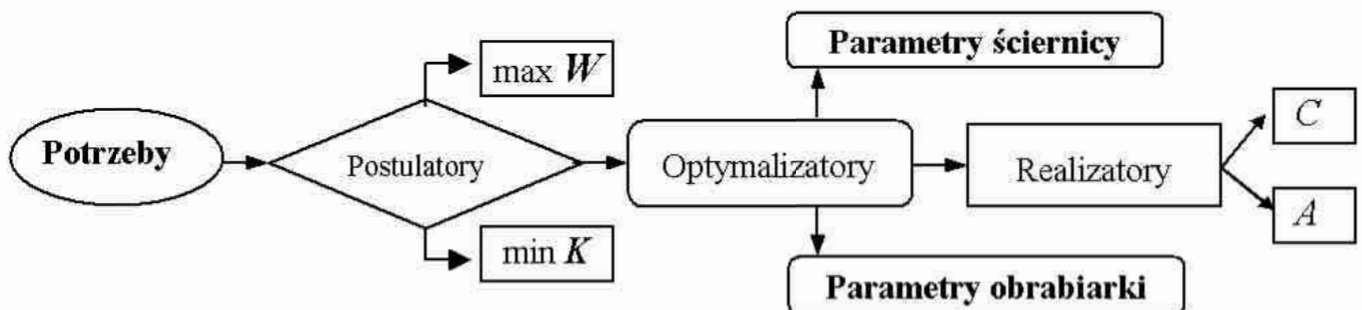
Jeżeli wewnątrz systemu, na skutek nieokreśloności, istnieje pewna swoboda działania, to poszczególne człony dążą do uzyskania stanów dogodnych dla siebie, czyli powstają optima lokalne J_i^* . Występuje więc pewna „gra” pomiędzy poszczególnymi członami, a stawką jest minimalizacja wysiłku. Gra się więc toczy o to: „*jak robić, aby zrobić i się nie narobić*”. Zamiast optymalizacji w systemie występuje więc suboptymalizacja, czyli wygrywanie partykularnych interesów [74]. W efekcie możliwych jest wiele różnych stanów funkcji celu J . W takim przypadku kryterium optymalności może być różnicą pomiędzy osiągalną wartością systemu działającego jako całość J^* oraz sumą osiągalnych wartości własnych kryteriów poszczególnych członów J_i^* :

$$\varepsilon = J^* - \sum_{i=1}^s J_i^* \quad (3)$$

W systemie o organizacji zdeterminowanej (idealnym) różnica ta równa się zero, czyli „interes” poszczególnych członów jest zgodny z „interese” całości. W systemach, których podstawą jest gra interesów poszczególnych członów, osiągalne są liczne optima lokalne na niekorzyść optimum globalnego i różnica ta jest ujemna. Tego typu systemy wymagają więc innego rodzaju podejścia.

Podstawą planowania stanów optymalnych musi być model statystyczny, oparty na informacjach uzyskanych z prób wyrywkowych. Z próby określa się wartości średnie wskaźników planowanych i ich dyspersje zależne od niejednoznaczności danych wyjściowych. W granicach odchyłeń standardowych (od spodziewanych wartości średnich) jest dopuszczalna gra poszczególnych członów według własnych kryteriów optymalności. W przypadku, gdy wszystkie uwzględniane w modelu wielkości są dostatecznie ściśle ustalone i mogą być traktowane jako stałe (lub przynajmniej quasi-stałe), mamy do czynienia z modelem deterministycznym. Jeżeli chociaż jedna z tych wielkości jest zmienną losową o znanym rozkładzie prawdopodobieństwa, to budowany model musi być probabilistyczny [146]. Zastępowanie sterowania procesu przez operatora (C) sterowaniem przez automat (A) jest pierwszym krokiem do zwiększenia determinizmu w systemie. Istniejące systemy sterowania cyklem pracy szlifierek według algorytmu (A), oparte są najczęściej na stabilizacji siły odporowej F_p lub mocy skrawania P_c . Wybór parametru podlegającego regulacji ma istotne znaczenie, ponieważ od niego zależy przebieg procesu sterowania oraz konstrukcja samego układu [1].

Optymalizacja procesu obróbki zautomatyzowanej polega na wyszukiwaniu ekstremum warunkowego funkcji celu, czyli na poszukiwaniu stanu optymalnego, spełniającego nałożone na przebieg tego procesu warunki ograniczające w postaci więzów słabych i mocnych. Optymalnym jest taki proces, którego czynniki programowe (parametry procesu) i czynniki wynikowe spełniają wszystkie postawione im warunki, a proces najlepiej spełnia kryteria jego oceny. W większości procesów technologicznych występuje kilka wielkości wyjściowych, od których można byłoby żądać osiągnięcia wartości ekstremalnych, czyli spełnienia różnych kryteriów optymalizacji. W obróbce ścierniej zasadniczo istnieją dwie grupy czynników podlegających optymalizowaniu. Są nimi parametry obróbki albo parametry ściernicy – rys. 11.

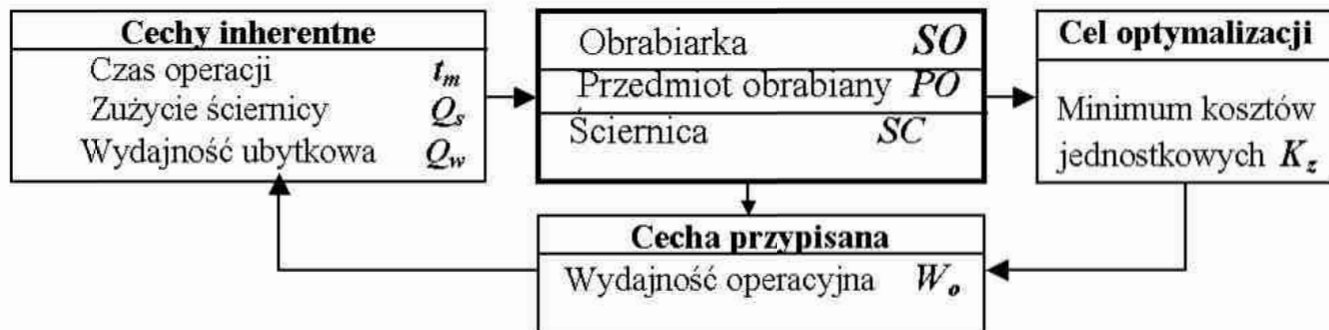


Rys. 11. Model postępowania optymalizacyjnego w obróbce ścierniej

Fig. 11. Model of optimization procedure for abrasive machining

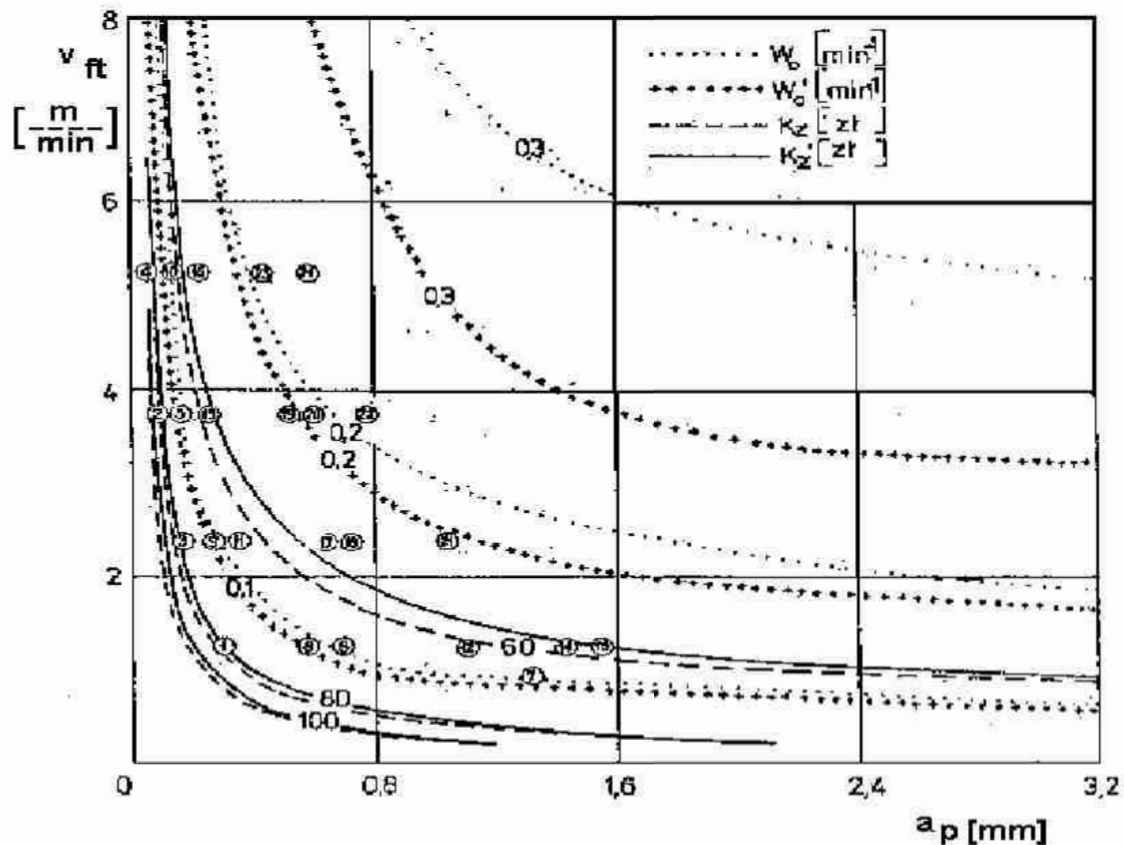
W procesie szlifowania zautomatyzowanego wskazane jest przyjmowanie za kryterium optymalizacji wydajności produkcyjnej operacji W_o lub kosztu jednostkowego K_z , gdyż są one zasadniczymi wskaźnikami techniczno-

ekonomicznymi. Warunki ograniczające związane będą wtedy np. z jakością warstwy wierzchniej, dokładnością wymiarowo-kształtową, siłą lub mocą szlifowania [49]. Koszty jednostkowe produkcji są syntetycznym wskaźnikiem, dającym kompleksową ocenę jakości zastosowanych rozwiązań organizacyjno-technicznych. Dążenie do osiągnięcia określonych syntetycznych wskaźników kosztowych zmusza często jednak do przyjmowania kryteriów pośrednich (częstkowych), które są łatwiej mierzalne [79]. Idealnym rozwiązaniem byłby kompleksowy model optymalizujący według różnych kryteriów i ujmujący cały projektowany system. Jednakże złożoność zagadnienia, a także duża losowość zjawisk w obszarze obróbki ścierniej stwarza nieracjonalność takiego postępowania, bowiem w miarę wzrostu liczby badanych cech, powyżej $n = 2$, sprawność systemu szybko maleje [48]. Oznacza to, że wypracowanie diagnoz na podstawie logicznej analizy jednocześnie wielu wyników jest mało efektywne. Z tego też powodu buduje się cząstkowe modele optymalizacyjne, dotyczące tylko określonych cech systemu. W takiej sytuacji trzeba się jednak liczyć z tym, że w procesie produkcji poszczególne elementy na siebie oddziałują. Wydajność operacyjna jest cechą przypisaną do danego systemu. Zależy od czasu operacji t_m , zużycia ściernicy Q_s i wydajności ubytkowej (Q_w), będącej funkcją parametrów obróbki. Do powiązania tych elementów z funkcją celu buduje się odpowiedni model matematyczny – rys. 12.



Rys. 12. Model systemu obróbki ścierniej w ujęciu atrybutowym
Fig. 12. Model of abrasive machining system in attribute terms

Szczegółowy model matematyczny optymalizacji można opracować jednak tylko dla konkretnego systemu operacyjnego. Przykład takiego postępowania, dla czołowego szlifowania płaszczyzn, zaprezentowano w pracy [49]. Przeanalizowano w nim wpływ postaci funkcji celu i warunków ograniczających na wynik optymalizacji. Graficzny obraz uzyskanych zależności przedstawiono na rys. 13.



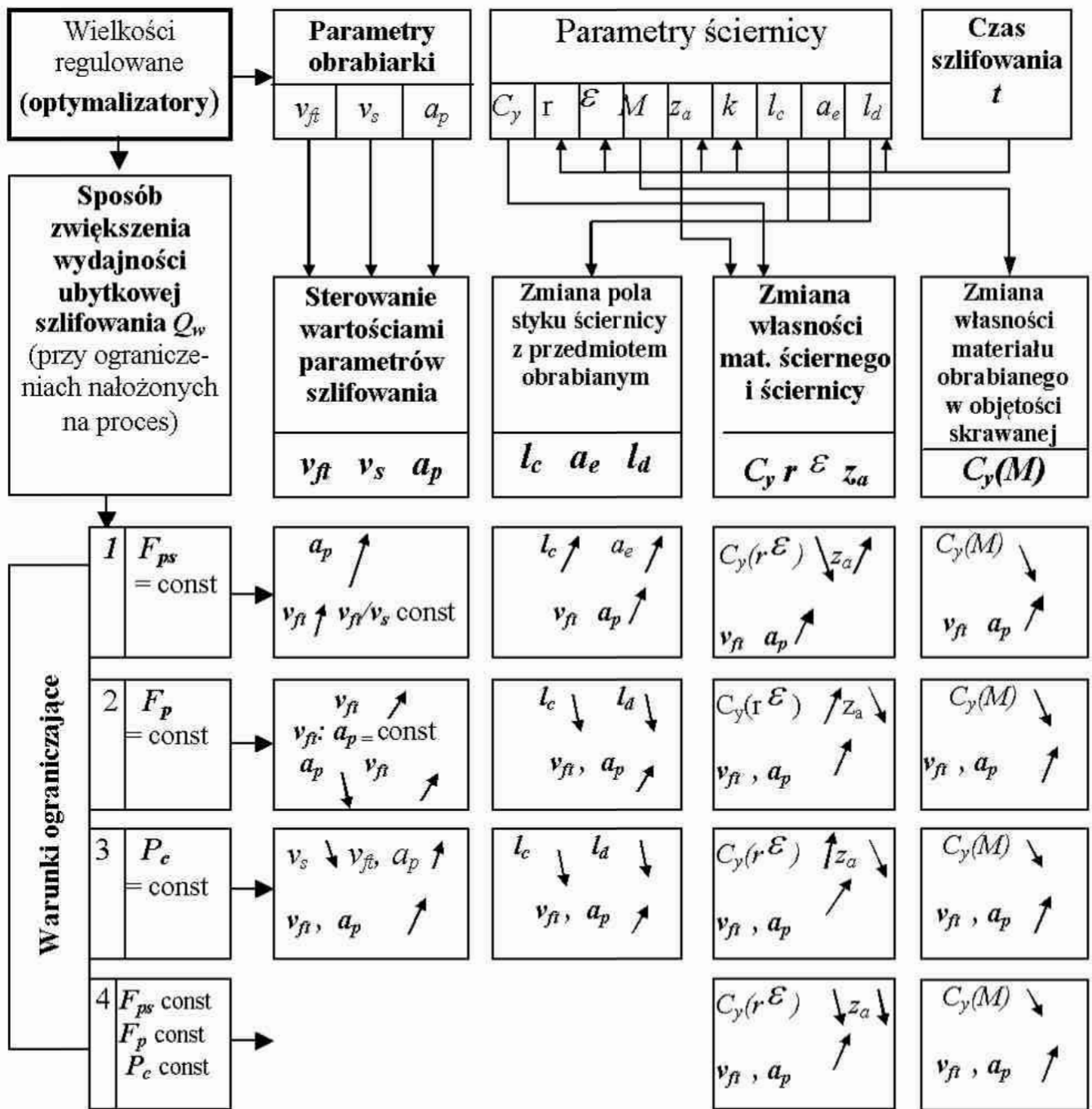
Rys. 13. Rozmieszczenie punktów odpowiadających rozwiązaniom optymalnym parametrów obróbki: styku wglębnego a_p oraz prędkości posuwu stycznego stołu v_{ft} dla różnych ograniczeń i postaci funkcji celu

Fig. 13. Distribution of points complying with optimum solution to process parameters: back engagement a_p and tangential table feed speed v_{ft} for different bounds and forms of objective functions

Wynika z niego, że położenie punktu odpowiadającego optymalnym wartościom badanych parametrów, zależy w sposób istotny od wyboru wielkości wyjściowej, stanowiącej funkcję celu, oraz poziomów dopuszczalnych zmian innych wielkości, na które nałożono warunki ograniczające.

Proces optymalizacji w obróbce ścierniej związany jest zatem bardzo mocno z wymaganiami postawionymi dla konkretnego systemu operacyjnego. Zależy on bowiem nie tylko od parametrów obróbki, ale także od własności stereometrycznych i fizycznych obrabianego materiału oraz od zmiennej w czasie mikrogeometrii i makrogeometrii ściernicy. W zakresie obróbki zautomatyzowanej dochodzą do tego warunki ograniczające, określające parametr podlegający sterowaniu adaptacyjnemu.

Sposoby zwiększenia wydajności ubytkowej Q_w , (będącej podstawą wydajności operacyjnej W_o i kosztów K_z) dla analizowanej odmiany szlifowania przedstawiono na rys. 14 [50].



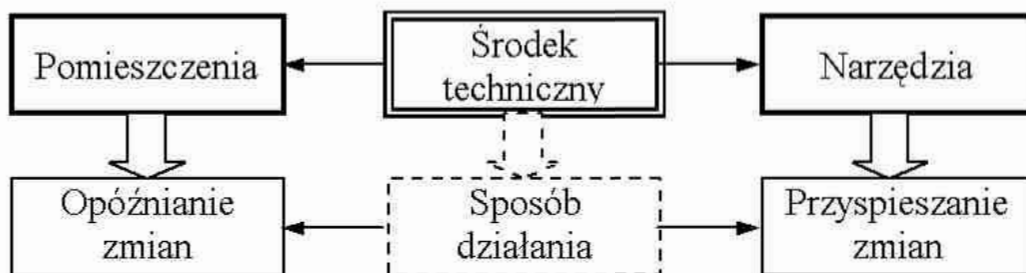
Rys. 14. Sposoby zwiększania wydajności ubytkowej czołowego szlifowania płaszczyn w warunkach ograniczeń nałożonych na proces

Fig. 14. Methods for increasing the material removal rate of surface face grinding

Jeżeli przyjmiemy, że w zautomatyzowanym systemie operacyjnym powstają wewnętrzne warunki zdeterminowanej, powtarzalnej produkcji, to naturalnym warunkiem optymalizacyjnym jest stabilizacja na wejściu i wyjściu z systemu. Stabilizacja na wyjściu oznacza produkcję jednorodnych wyrobów. Stabilizacja na wejściu oznacza jednakże konieczność używania narzędzi ściernych o jednorodnych cechach budowy [153].

1.3. Budowa narzędzi ściernych w ujęciu systemowym

Obróbka ścierna jest zadaniem operacyjnym realizowanym przy użyciu odpowiednich środków technicznych. Definitywnie do środków technicznych *zalicza się* każdy przedmiot materialny, służący do przetwarzania masy, energii lub informacji [17]. Inaczej można powiedzieć też, że środek techniczny to: „określony wyrób z przynależnym mu działaniem”. Działaniem zaś jest ciąg zdarzeń, w wyniku których realizuje się określoną potrzebę, stanowiącą cel podjętego działania. Cel powinien wskazywać przy tym, jaki jest priorytet danego zadania. Ogólnie rzecz biorąc, celem tym może być spowalnianie zmian stanów co jest zadaniem środków technicznych z grupy „pomieszczenia”, lub przyspieszanie tych zmian co jest domeną działania środków technicznych o nazwie „narzędzia” [71]. Prakseologiczny cel działania środków o nazwie narzędzia przedstawiono na rys.15.

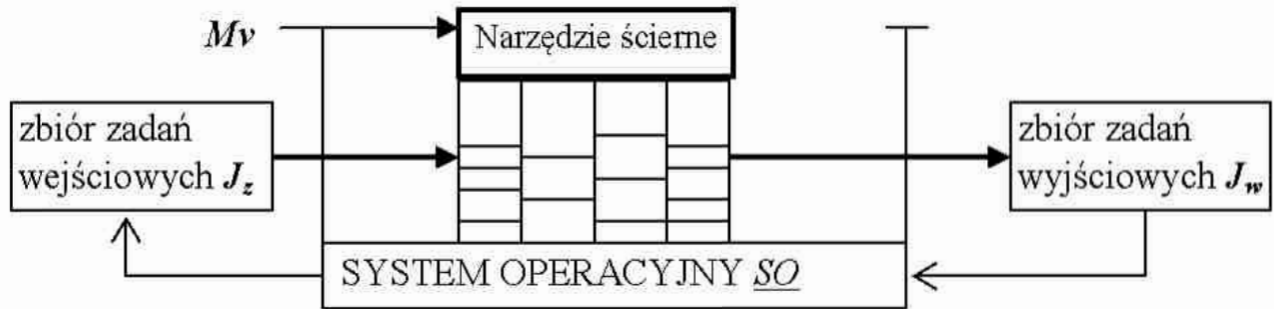


Rys. 15. Prakseologiczny cel działania środków technicznych

Fig. 15. Praxiological objective of technological means

Podstawowym zadaniem narzędzia ściernego jako środka technicznego jest zatem: przyspieszanie celowych zmian w obszarze obróbki ścierniej. Ocena jakościowa i ilościowa narzędzia winna w istocie rzeczy dotyczyć tego zagadnienia, przy czym: im intensywność zmian jest większa tym lepsza jego jakość. W zakresie obróbki ścierniej celem tym jest zwykle uzyskanie odpowiednich przekształceń w stereometrii warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu jeżeli jest to obróbka wykańczająca, lub usunięcie określonego naddatku – jeżeli jest to obróbka wydajnościowa [33]. Na początku procesu zdarzeń zawsze jest więc potrzeba – cel techniczny, do realizacji którego dobieramy narzędzie o hipotetycznym potencjale użytkowym (jakości Q_p), określonym w procesie projektowania przez charakterystykę techniczną. Rozpoznanie tego celu umożliwia integrację określonych elementów w jeden celowy twór zwany narzędziem ściernym. Twór ten nie występuje jednak samoistnie. Jego użyteczność (intensywność dokonywanych zmian) wynika także z dynamiki (Mv) systemu operacyjnego (obrabiarki lub innego urządzenia), z którym współpracuje. Narzędzie

ściernie jest bowiem elementem większej całości (systemu \underline{SO}), którą tworzą trzy klasy zbiorów rys. 16 [133].



Rys. 16. Model powiązań systemowych narzędzi jak środków technicznych
Fig. 16. Model for system connections of tools as technological means

Klasę elementów E tworzy zbiór wzajemnie powiązanych składników budowy strukturalnej narzędzia ściernego: ziarna o objętości V_z , spoiwa o objętości V_s oraz (por) o objętości V_p . Udział tych elementów zależy od zaprojektowanej charakterystyki technicznej (konstrukcji systemowej) narzędzia.

Zbiór zadań przeznaczonych do wykonania w systemie (wejściowych) tworzy drugą klasę (J_z). Składają się na nie: parametry charakteryzujące przetwarzany materiał, algorytm realizacji zadania, założone docelowe parametry techniczne wyrobu końcowego oraz wymagane parametry czasowe, których spełnienie jest konieczne, by uznać realizację danego zadania za poprawną.

Trzecią klasę tworzy zbiór zadań wyjściowych, czyli wyników rzeczywistej realizacji zadań w systemie operacyjnym \underline{SO} . Zadanie wyjściowe będzie zbiorem uzyskanych wartości parametrów technicznych i czasowych (J_w). Przez porównanie wyników (J_w) z założeniami (J_z) można stwierdzić, czy dane narzędzie wykonuje swoje zadania poprawnie (niezawodnie). Jest to zadanie operatora OP (członku sterującego A lub C) dokonującego regulacji R systemu.

Ogólna notacja narzędzia, jako systemu \underline{SN} , wyraża się więc następująco:

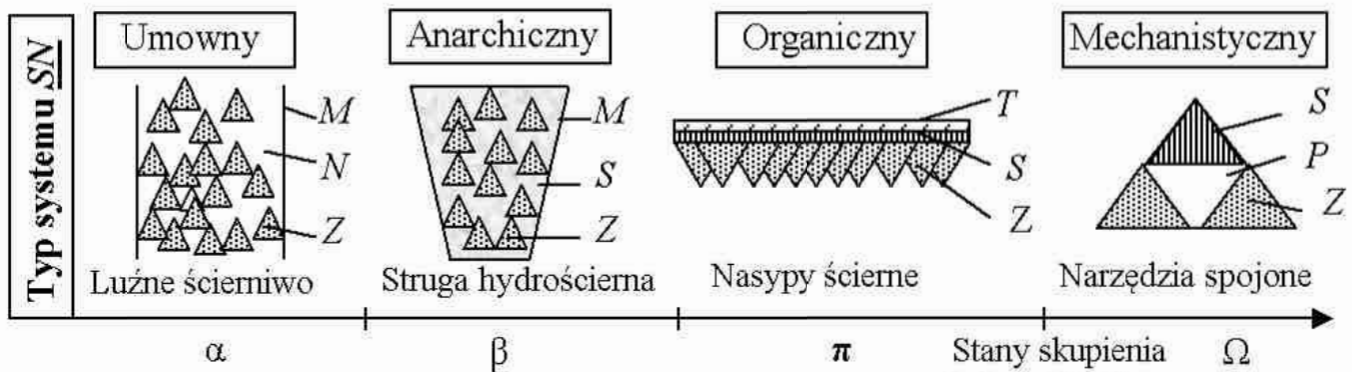
$$\underline{SN} = R\{J_z, A \cap C, E, J_w\} \quad (4)$$

Spojrzenie w głąb systemu pozwala dostrzec jego strukturę oraz zapewniany przez nią ład jednostek, zasobów i działań. Centralną zasadą leżącą u podstaw podejścia systemowego jest bowiem twierdzenie, że struktura systemu determinuje sposób jego działania oraz cele, jakie system może realizować [117]. Strukturą lub konfiguracją funkcjonalną $S^{(1)}$ systemu określa się zasoby systemu niezbędne do realizacji zadania [157]. Zatem dla danego przypadku:

$$\underline{SN}^{(1)} = OP\{J_z^{(1)}, A^{(1)} \cap C^{(1)}, E^{(1)}, J_w^{(1)}\} \quad (5)$$

System można rozpatrywać jako sumę struktur funkcjonalnych, zmieniających się wraz ze zmianą stawianych przed nim zadań oraz pojawiających się innych zdarzeń systemowych, w tym zwłaszcza stanów zawodności (wynikających z uszkodzeń elementów roboczych) [21].

Struktura funkcjonalno-niezawodnościowa systemu narzędziowego \underline{SN} jest więc rozszerzeniem konfiguracji funkcjonalnej o te elementy działania, które wynikają z ograniczonej niezawodności ziaren ściernych, tj. wystąpienia określonego typu uszkodzenia, które pociąga za sobą konieczność odnowy czynnej powierzchni narzędzia w procesie obciążania. Ze stanu skupienia elementów struktury technicznej wynika natomiast struktura organizacyjna, która jest środkiem osiągnięcia celów systemu. Określa ona konstrukcję narzędzia ściernego – rys.17 [133].



Rys. 17. Modele konstrukcji systemowych narzędzi ściernych

Fig. 17. Models of system designs for abrasive tools

W stanie skupienia α ziarna ścierna Z powiązane są „spoiwem niematerialnym N, które powstaje z oddziaływania pola magnetycznego lub pola przyspieszeń wytwarzanych w nadsystemie M. Tego typu powiązania ziaren występują w obróbce strumieniowo-ścierniej, rotacyjno-kaskadowej i wibracyjno-proszkowej. Zalicza się też do nich obróbkę ścierną odśrodkową, magnetyczno-ścierną i wirową. W obróbce magnetyczno-ścierniej stosowane są ziarna ferro-magnetyczne, których wzajemne powiązania wymusza pole magnetyczne. W pozostałych obróbkach tego zbioru przestrzenne powiązania ziaren ściernych determinują siły bezwładności [81]. Jest to zatem tylko pewne fikcyjne zorganizowanie ziaren – system umowny. W tym quasi systemie wyróżnić można struktury: przynależności oraz rodzajowo-ilościową (ze względu na formę i ze względu na tworzywo). Nie ma jednak struktury funkcjonalnej ani struktury podporządkowania (hierarchicznej), a głównie te struktury przyjmuje się za podstawę więzi organizacyjnych w systemie [143].

Tego typu struktur można się już doszukać w kolejnym stadium (β) rozwoju systemu \underline{SN} , kiedy ziarna ścierna zostają spojone ze sobą przez ciecz, np. przy

obróbce strugą hydrościerną. Po wymieszaniu w mieszalniku (nadsystemie M), zostają ukierunkowane do określonej pracy przez strumień S cieczy o wysokiej prędkości. Zachowaniem się ziaren Z steruje się, w sposób globalny, przez odpowiednią konstrukcję mieszalnika oraz regulację energii kinetycznej strugi cieczy [10]. Mimo zaistnienia już w systemie pewnej struktury hierarchicznej, wynikającej z podziału zadań pomiędzy elementami systemu, w strukturze organizacyjnej występuje jednak bardzo duża przypadkowość położenia ziaren (sterowane są one bowiem tylko globalnie). Tego rodzaju struktura organizacyjna tworzy więc *system anarchiczny*.

Jeżeli ziarna ściernie Z połączy się na trwale spoiwem S na pewnym podłożu (np. taśmie T), to tworzą się struktury systemowe, wynikające z funkcji i podporządkowania. Powstaje więc nowa organizacja systemowa (typu π) o znacznie wyraźniejszej strukturze hierarchicznej. Elementami kierującymi pracą elementów roboczych (ziaren) jest spoiwo i od jego woli (siły wiązania) zależy, jak długo ziarna będą uczestniczyć w działaniu. Przykładem tego typu organizacji systemowej są nasypy ściernie. Taka struktura organizacyjna tworzy *system organiczny*. Pomiedzy elementami systemu występują bowiem więzi organizacyjne, które wymagają podejścia fenomenologicznego (pracy u podstaw), wyjaśniającego: jak i dlaczego dana struktura jest skuteczna [81]. Zwiększa się więc stopień trudności w sterowaniu takim systemem o miękkiej konstrukcji. Jednak – jak pokazuje praktyka – jest to wykonalne [113]. Ponadto (z prac prowadzonych w zakresie zastosowania pola magnetycznego, elektrycznego lub specjalnych separatorów mechanicznych) podczas procesu wytwarzania narzędzi nasypowych wynika, że możliwe jest nawet „właściwe” ukierunkowanie do pracy ziaren jako elementów roboczych [9].

Narzędzia nasypowe wykonywane są najczęściej jako jednowarstwowe. Wszystkie ziarna ściernie wykonują pracę skrawania i nie tworzą układów rezerwowych. Nie można zatem wyróżnić struktury niezawodnościowo równoległej. Trwałość takich narzędzi jest więc stosunkowo mała, bowiem po wykruśzeniu się ziarna z powierzchni czynnej nie jest ono zastępowane przez ziarna z niższych poziomów (nie odbywa się proces odnowy zdolności skrawnych). W tego typu narzędziach podczas zadania obróbkowego (nadanego systemowi operacyjnemu) pomiędzy ziarnem (Z), spoiwem (S) oraz podłożem (T) występuje tylko powiązanie szeregowo. Przy tego rodzaju powiązaniu prawdopodobieństwo wykonania pracy przez narzędzie (jego niezawodność R) jest iloczynem niezawodnej pracy poszczególnych elementów [135]. Chcąc więc zwiększyć pewność wykonywania zadań przez to narzędzie należy podnosić jakość każdego z tych elementów: ziarna Z , spoiwa S oraz podłoża T .

Wprowadzenie w konstrukcję systemową rezerwowych poziomów roboczych (z ziaren leżących głębiej) przenosi system na wyższy poziom zorganiz-

zowania. Nowe pokolenia ziaren zastępują te, które utraciły swoją moc sprawczą i zostały usunięte z czynnej powierzchni narzędzia. W takim przypadku zmienia się struktura organizacyjna: z płaskiej na przestrzenną. Przykładem takiego działania jest konstrukcja taśmy ścierniej z ziarnami pęcherzykowymi. Wyróżniają się one przestrzenną strukturą, w której ziarna ściernie są naniesione są na powierzchni pustej w środku powłoki sferycznej utworzonej przez spoiwo ceramiczne lub żywiczne. Narzędzia takie charakteryzują się bardzo dobrym samoostrzeniem się [96]. Posiadają już bowiem załążki trzeciej (istotnej dla działania narzędzi ściernych) fazy, jaką są wolne przestrzenie, czyli pory.

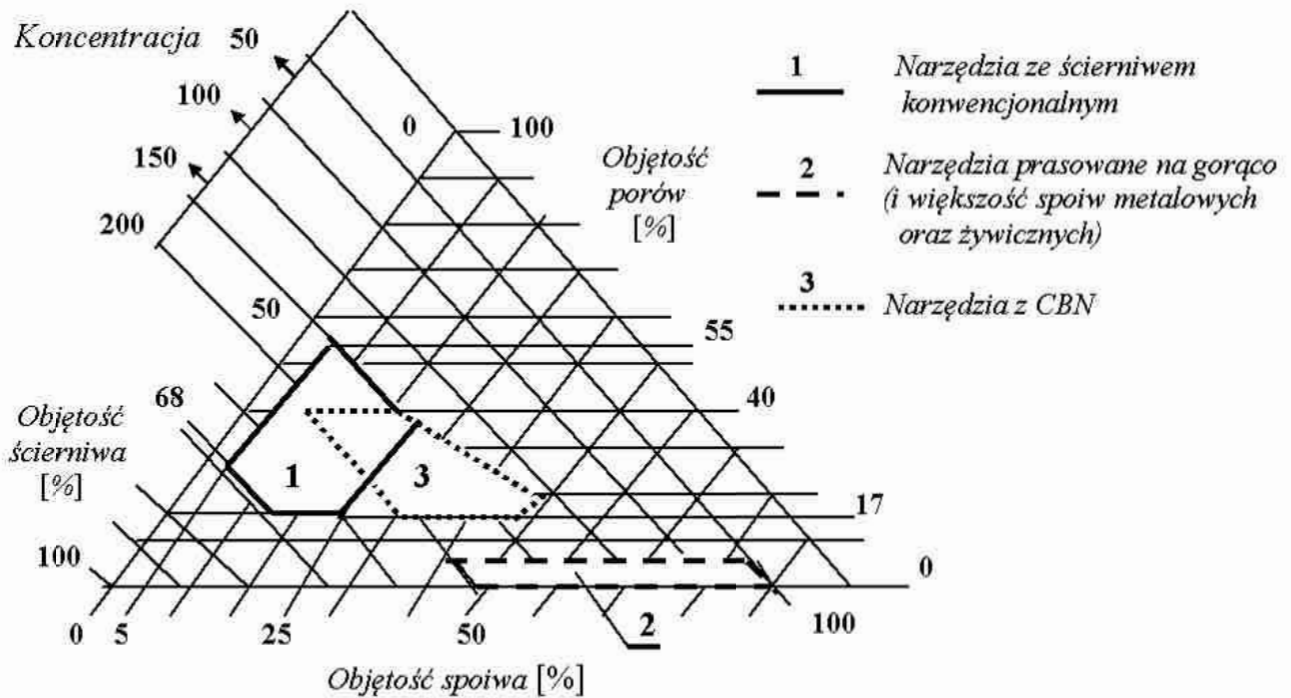
Narzędzia, w których pory są integralną częścią ich konstrukcji, tworzą strukturę organizacyjną bardziej złożoną od poprzedniej, dlatego przesuwają system na wyższy poziom organizacji systemowej. Można powiedzieć, że jest to system (pod względem strukturalnym) typu Ω , czyli całkowicie ukończony. Ponieważ więzi systemowe budowane są według praw mechaniki (działanie wysokiej temperatury, nacisku itp.), dlatego też ten typ systemu można określić jako *mechanistyczny*. W praktyce odzwierciedla się on przez konstrukcję spojonych narzędzi ściernych. W tego typu narzędziach kolejne warstwy elementarnych układów ZS (ziarna i spoiwa) tworzą pokolenia zastępcze, uaktywniane do pracy podczas procesu obciążania. W ujęciu ogólnym warstw tych może być: $i = 1, 2, 3 \dots m$, a w każdej warstwie może być: $j = 1.2.3 \dots n$ układów elementarnych. Taką mieszaną strukturę systemu pod względem niezawodnościowym można określić jako równoległo-szeregową. Przy tego typu powiązaniu elementów składowych niezawodność R całego układu wynika z połączenia niezawodnościowego prawa iloczynu i prawa rezerwy [63]. Z analizy tych praw wynika, że pewność wykonania zadania przez spojone narzędzie ściernie (niezawodność R) wzrasta wraz z ilością m warstw ziaren ściernych, uaktywnianych w procesie odnowy, maleje natomiast wraz z długością linii aktywnych ziaren ściernych [135].

Regulację struktury organizacyjnej spojonych narzędzi ściernych, w celu uzyskania określonych właściwości użytkowych, rozpoczęto w USA na podstawie patentu Howe i Martina z 1934 roku [40]. Opracowana przez tych autorów zasada polegała na liniowej zmianie dozowanych składników, przy zachowaniu stałych udziałów objętościowych (ziarna V_z i spoiwa V_s). Pozwoliło to na regulację trzeciego składnika, tj. por V_p , zgodnie z równaniem:

$$V_z + V_s + V_p = 100\% \quad (6)$$

Do zobrazowania strukturalnego powiązania pomiędzy tymi składnikami używa się wykresu trójskładnikowego. Ujmuje on linie stałych wartości udziałów objętościowych składników, wynikające z powyższego równania. Ze względu na różne ograniczenia wytrzymałościowe i produkcyjne, w praktyce do pro-

dukcji standardowych narzędzi ściernych wykorzystuje się jednak tylko około 10% możliwych składów recepturalnych – rys. 18 [47].



Rys. 18. Model systemowego powiązania składników budowy i obszarów produkcji narzędzi ściernych [47]

Fig. 18. Model for system connection of structure components with abrasive tools manufacturing regions [47]

W narzędziach ściernych z konwencjonalnych ścierniw (elektrokorund, węgiel krzemu) proporcje składników dobierane są z obszaru 1. Do narzędzi ze ścierniw konwencjonalnych oraz supertwardych (CBN), wykonywanych technologią prasowania na gorąco i na zimno, wykorzystuje się składy z obszaru 3. Natomiast obszar 2, leżący u podstawy trójkąta składów (z porowatością bliską zera) wykorzystuje się przy recepturowaniu narzędzi ze spoiw ceramicznych, prasowanych na gorąco, ze ścierniwami konwencjonalnymi i supertwardymi, a także narzędzi ze spoiwem metalowym i żywicznym. W zakresie ścierniw konwencjonalnych i spoiw ceramicznych dobór proporcji poszczególnych składników realizowany jest w postępie arytmetycznym o różnicy ciągu $\varphi_s = 2\%$ dla materiału ściernego i $\varphi_h = 1,5\%$ dla spoiwa. Ciąg φ_s ma zapewnić uzyskanie odpowiedniej struktury ściernicy N_s , zaś ciąg φ_h odpowiedniej jej porowatości. Udział objętościowy por V_p określa twardość narzędzia według historycznie ustalonej literowej skali Nortona (G,H,I...). Tego typu system, dotyczący budowy narzędzi ściernych ze spoiwami ceramicznymi, objęty jest Polską Normą (PN 71-59101) tabl. I.

Tabl. I. Tablica składowych strukturalnych ceramicznych narzędzi ściernych**Tabl. I.** Table of structural compositions of ceramic abrasive tools

Twardość	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
Nr struktury N_s	V_z [%]	Objętościowy udział por V_p [%]											
		46,5	45	43,5	42	40,5	39	37,5	36	34,5	33	31,5	30
		Objętościowy udział spoiwa V_s [%]											
0	62						0,5	2	3,5	5	6,5	8	9,5
1	60					1	2,5	4	5,5	7	8,5	10	11,5
2	58					1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	13,5
3	56				2	3,5	5	6,5	8	9,5	11	12,5	15,5
4	54		2,5	4	5,5	7	8,5	10	11,5	13	14,5	16	17,5
5	52		3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	16,5	19,5
6	50	3,5	5	6,5	8	9,5	11	12,5	14	15,5	17	18,5	21,5
7	48	5,5	7	8,5	10	11,5	13	14,5	16	17,5	19	20,5	23,5
8	46	7,5	9	10,5	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21	22,5	25,5
9	44	9,5	11	12,5	14	15,5	17	18,5	20	21,5	23	24,5	27,5
10	42	11,5	13	14,5	16	17,5	19	20,5	22	23,5	25	26,5	29,5
11	40	13,5	15	16,5	18	19,5	21	22,5	24	25,5	27	28,5	31,5
12	38	15,5	17	18,5	20	21,5	23	24,5	26	27,5	29	30,5	33,5

Tablica ta ujmuje składy recepturalne spojonych narzędzi ściernych ze spoiwami ceramicznymi i jest podstawą ich wytwarzania. Znając bowiem gęstość użytego ziarna ściernego i spoiwa można wyznaczyć masy składników, które należy użyć do wykonania danego narzędzia [121]. Stosuje się przy tym zasadę, że dla określonej struktury i twardości narzędzia ściernego potrzebna jest taka sama ilość spoiwa, niezależnie od własności wytrzymałościowych użytego ziarna ściernego i spoiwa. W praktyce jednak właściwości eksploatacyjne narzędzi ściernych zależą w sposób istotny od typu użytego spoiwa ceramicznego [136].

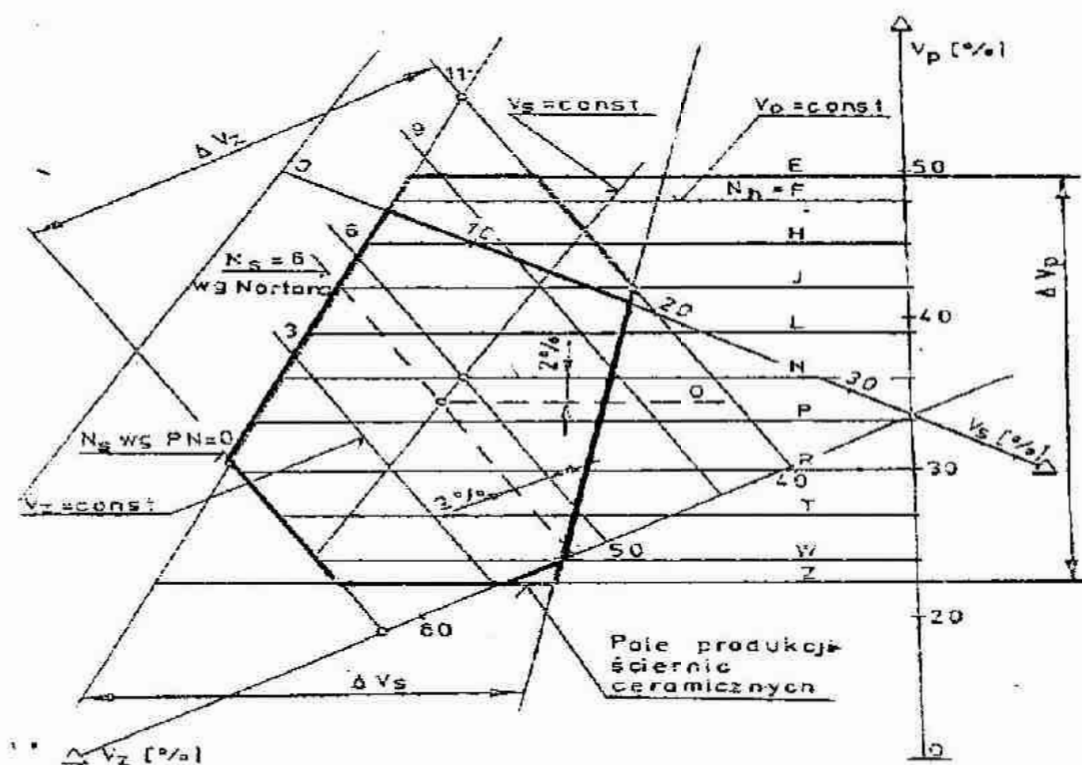
Obliczenia analityczne, przeprowadzone przez Opitza i Peklenika, wykazały oddziaływanie tak konstruowanej budowy narzędzi ściernych na siły utwierdzenia ziaren ściernych – jednego z najważniejszych parametrów charakteryzujących strukturę organizacyjną systemu narzędziowego \underline{SN} . Wzrost siły utwierdzenia ziarna ściernego może być osiągnięty na drodze zwiększania objętości ziarna, spoiwa lub jednego i drugiego składnika razem [101].

W świetle tych obliczeń, na siłę utwierdzenia ziaren ściernych nie wpływa wielkość poszczególnych por – liczy się bowiem tylko ich udział globalny. Wykazano jednakże, że wielkość pojedynczego poru wywiera bardzo znaczny wpływ na trwałość ściernicy (a więc na siłę utwierdzenia ziaren ściernych). [94]. Tłumaczy się to tym, że pory mogą pełnić rolę koncentratorów naprężeń, wykazujących tendencje do rozszerzania swego oddziaływania pod wpływem przyłożonej siły. Wykazano, że w przypadku tworzyw kruchych (jakimi są konwencjonalne ścierniwa i spoiwa ceramiczne) proces zniszczenia mostków

spoiwa nie jest warunkowany koniecznością osiągnięcia w całej jego objętości naprężenia o wartości teoretycznej wytrzymałości kohezyjnej (obliczenia Opitza i Peklenika). Wystarczy bowiem, że naprężenie takie wystąpi na odpowiednim koncentratorze naprężeń, typu Griffitha, by nastąpił jego rozwój w makropęknięcie, mimo że nominalne naprężenie nie przekracza wartości krytycznej [60].

Przy recepturowaniu narzędzi ściernych według tabl. I zakłada się również, że struktura tych narzędzi nie zależy od wielkości użytego ziarna ściernego. Zarówno teoria [156], jak i praktyka [61] wykazują jednak, że pogląd taki nie jest uzasadniony.

Nie wszyscy producenci stosują też recepturowanie składów narzędzi ściernych zgodnie z wytycznymi ujętymi w tabl. I. Wykazano [121], że konwencjonalne narzędzia ściernie o spoiwie ceramicznym, wykonywane według technologii firmy NORTON, mają przesunięcie udziałów objętościowych ziarna V_z o 2% w stosunku do ustalonych Polską Normą. Przesunięcie to powoduje, że przy niezmiennym udziale objętościowym spoiwa uzyskuje się narzędzia o jeden stopień twardsze niż u innych producentów – rys. 19 [122].

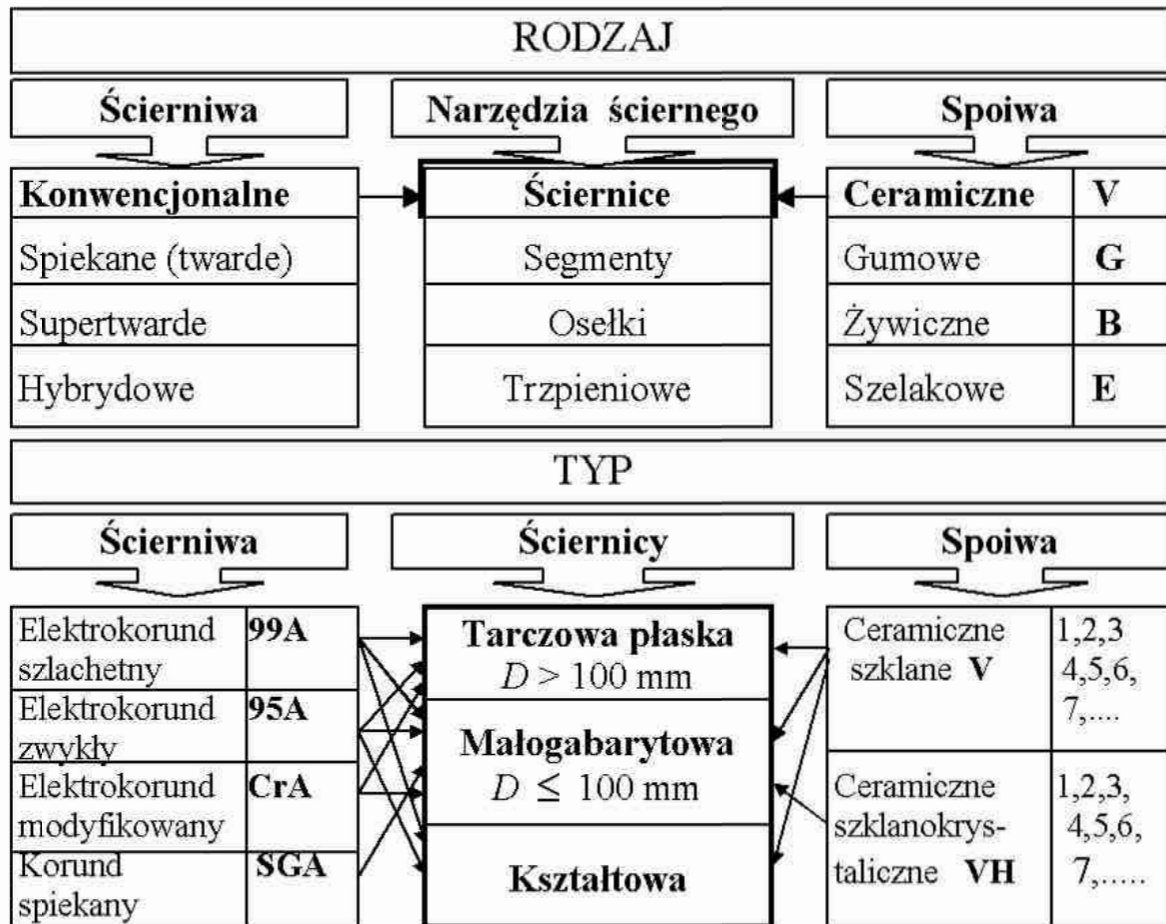


Rys. 19. Model różnic systemowych w budowie ściernic ceramicznych różnych producentów

Fig. 19. Model of system differences in structure of ceramic grinding wheels from various producers

Jest to istotna różnica systemowa, która może prowadzić do nieporozumień podczas stosowania tych narzędzi w praktyce przemysłowej. Wszystko to wska-

zuje na potrzebę kompleksowych badań, pozwalających ustalić wpływ poszczególnych składników budowy narzędzi ściernych na ich zachowania się w warunkach eksploatacji. Jest to celem realizowanej pracy, a systemowe ujęcie rodzaju i typu badanych narzędzi przedstawiono na rys. 20.



Rys. 20. Systemowe ujęcie narzędzi ściernych poddanych badaniom

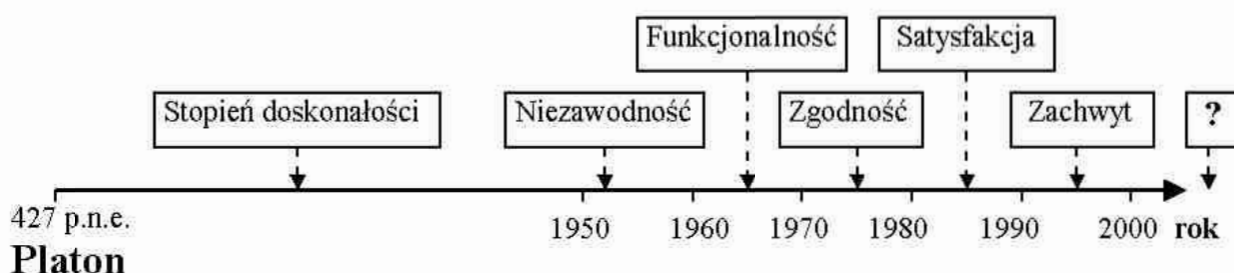
Fig. 20. System presentation of abrasive tools subject to tests

Zdecydowano się prowadzić badania głównie na ściernicach o ścierniwach konwencjonalnych i spoiwie ceramicznym. Ściernice tego rodzaju zajmują dominującą pozycję na światowym rynku narzędzi ściernych [149]. Dlatego właściwa ocena ich jakości, prowadząca w efekcie do racjonalnego wykorzystania, zwłaszcza w procesach obróbki powtarzalnej, ma istotne znaczenie ekonomiczne. Podobne przesłanki zadecydowały o wykorzystywaniu ścierniwa modyfikowanych typu SG. Ściernice z tego rodzaju materiałów charakteryzują się dużą trwałością, porównywalną do ściernic z CBN, ale zdecydowanie niższą ceną [100]. Do pełnego wykorzystania właściwości użytkowych potrzebna jest jednak prawidłowa ocena ich cech budowy [139].

1.4. Jakość jako szczególna cecha środka technicznego

Przejście Polski w obszar gospodarki wolnorynkowej i dostosowywanie krajowego rynku do standardów Unii Europejskiej, stawia szczególne wymagania dotyczące jakości produkowanych wyrobów. Współczesne technologie przemysłowe kształtowane są bowiem pod naciskiem trzech trendów: globalizacji, standaryzacji oraz jakości [16].

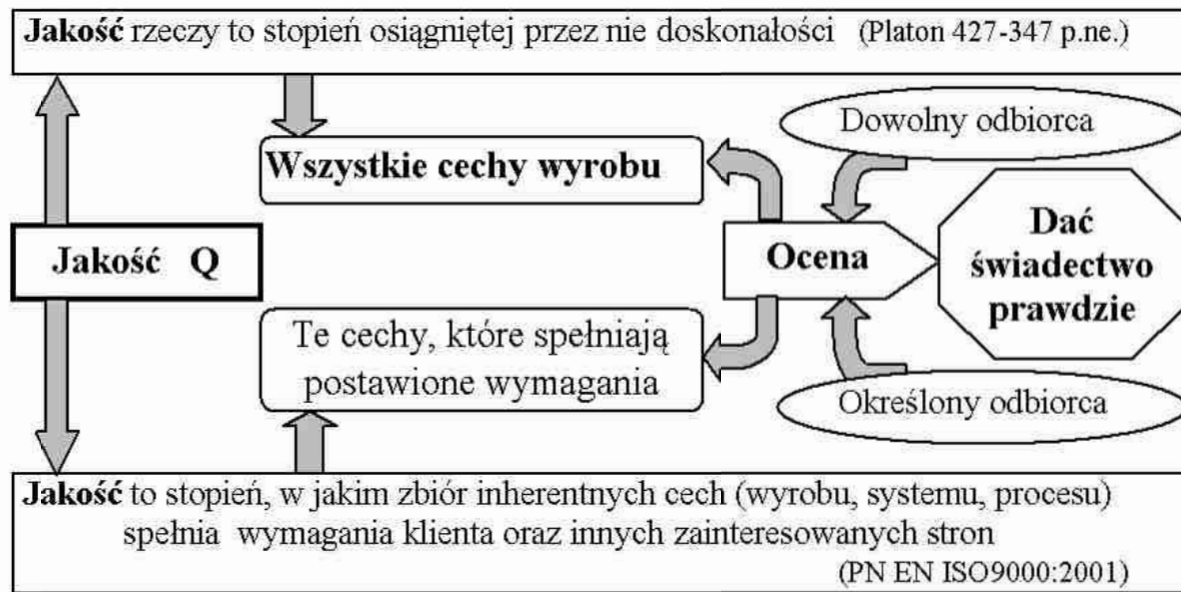
W kręgu kultury śródziemnomorskiej „jakość” zjawiała się jako kategoria filozoficzna w ontologii. Uważa się, że twórcą tego pojęcia był Platon (427–347 pne), który precyzował ją jako pewien stopień doskonałości, będącej niematerialnym wytworem myśli ludzkiej [147]. Pod względem etymologicznym jakość jest ścisłym tłumaczeniem łacińskiego słowa *qualitas*, które zostało wprowadzone przez Cyserona. Słowo to określa własność, właściwość przedmiotu. W wielu językach słowo to zachowało swoje pierwotne brzmienie – zbliżone do łacińskiego pierwowzoru (np. w j. angielskim „*quality*”, w j. francuskim – „*qualité*”, w j. niemieckim – „*die Qualität*”, rosyjskim „*качество*”) [68]. Także w słowniku j. polskiego istnieje słowo *kwalifikować*, które oznacza: „zaliczać do pewnych kategorii, określać, oznaczać jakość czegoś, oceniać coś”. Na przestrzeni ostatnich 50 lat pojęcie jakości podlegało jednak wielu zmianom. Był okres, kiedy dominowały techniczne aspekty: niezawodność, funkcjonalność, zgodność. Współcześnie natomiast nastąpiła czasami personalizacji jakości, budowania relacji z klientem i długotrwałego partnerstwa [150]. Dąży się więc do zawiązania nie tylko umysłem klienta, ale także i jego sercem – rys. 21 [140].



Rys. 21. Pojmowanie jakości na przestrzeni lat

Fig. 21. Quality aspects within the space of years

Współcześnie, przy hiper-konkurencji, która nastąpiła wraz z erą e-biznesu, utrzymanie klientów staje się głównym obszarem troski producentów. Badania dowodzą, że lojalność klienta możliwa jest tylko wtedy, gdy jego satysfakcja z produktu jest bliska doskonałości [44]. O ile więc kiedyś jakość opisywała: „*ile jest w rzeczy doskonałości*”, to współczesna definicja odnosi się tylko do doskonałości tych cech, które interesują określonego odbiorcę – rys. 22 [141].



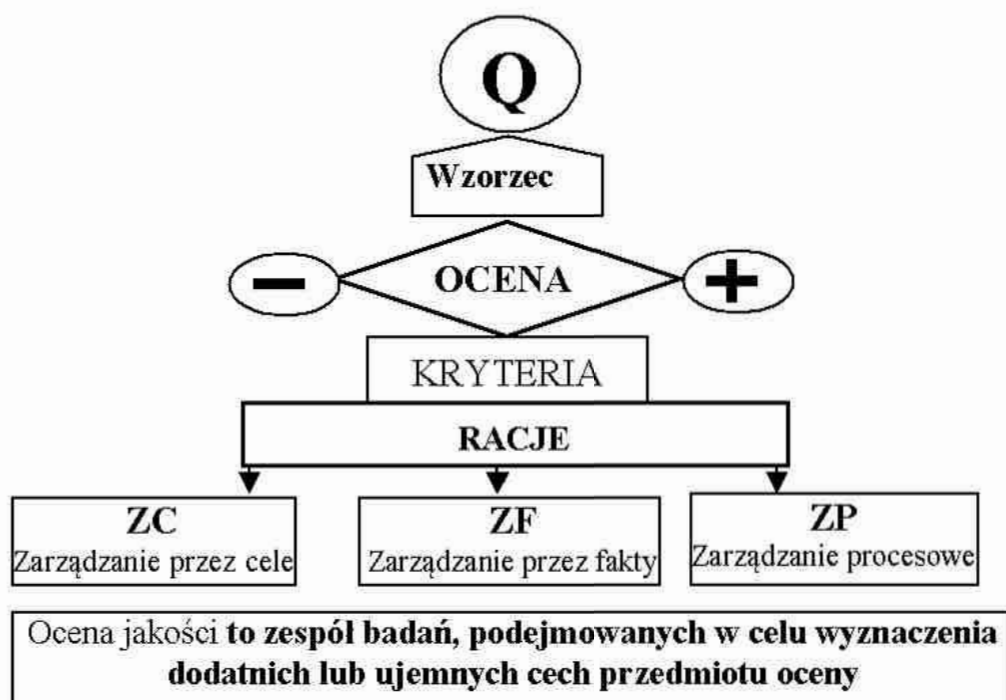
Rys. 22. Zmiana paradygmatu jakości
Fig. 22. Change in quality paradigms

Zgodnie z międzynarodowymi ustaleniami (PN EN ISO 9000:2001 „Systemy zarządzania jakością. Podstawy i terminologia”) jakość jest stopniem spełnienia przez inherentne cechy wyrobu wymagań postawionych przez określonego odbiorcę. W normie tej podaje się dalej, że „inherentna” oznacza *przynależna (sama w sobie)* i rozumiana winna być jako cecha różnicująca, nie należy przy tym cech różnicujących odnosić do tzw. jakości technicznej, ale do wszystkich korzyści, jakie dany wyrób niesie odbiorcy. W takim, współczesnym, rozumieniu jakości próbuje się połączyć ideę Platona (427–347 p.n.e.), iż „jakość konkretnej rzeczy oznacza stopień osiągniętej przez nią doskonałości”, z podejściem materialistycznym Artstotelesa (348–322 p.n.e.), który określał jakość jako „zespół swoistych cech odróżniających dany przedmiot od innych przedmiotów tego samego rodzaju” [31]. Niezależnie jednak od podejścia, w każdym przypadku jakość wymaga pewnego sądu wartościującego, zwanego oceną, by „dać świadectwo prawdziwe”: ile jest w danej rzeczy dobra? W definiowaniu jakości kładzie się bowiem nacisk na aspekt aksjologiczny, określając jakość jako „stopień” (dobra). Jednakże, problemy aksjologii należą do trudnych, głównie z uwagi na subiektywizm systemów wartości i ich praktycznych zastosowań [148].

Za pomocą kategorii wartości wyraża się relacje człowieka oraz wchodzących z nim w interakcje przedmiotów i innych ludzi. W działalności konstruktywnej (twórczej i wytwórczej) człowiek kształtuje rzeczywistość według przyjętego systemu wartości, a następnie kontroluje swoją skuteczność. Wynik tej kontroli w sensie platońskim jest nazywany jakością, natomiast według koncepcji

Arystotelesa – stanowi jedną z istotnych cech, umożliwiających badanie odmienności i podobieństwa przedmiotów ze względu na ich wartość [31]. Z potrzeb i celów człowieka (swoiście pojmowanych) wynikają specyficzne wymagania, w stosunku do ocenianych wyrobów, pozwalających na spełnienie tych potrzeb.

Użytkownik do realizacji swojej potrzeby wybiera wyrób, o którym sądzi, że spełni najlepiej jego oczekiwania (mniej lub bardziej racjonalne). Stosuje w tym względzie określone kryteria wyboru, które są czynnikami porządkująco-wartościującymi, a ich podłożem są jakieś racje [136]. U podłoża każdej działalności ludzkiej, a inżynierskiej w szczególności, leży jakaś racja. Bowiem każdy racjonalnie myślący człowiek robiąc coś, dąży do tego, aby wytwór jego działania był dobry – czyli wysokiej jakości. Coś jakościowo „dobre” opiera się na wartości. Wartość zaś wynika z sądu wartościującego, nazywanego oceną. Podstawą właściwej oceny są przyjęte kryteria, a podłożem kryteriów są właśnie racje, czyli punkty widzenia. Po ustaleniu odpowiedniego wzorca, sama ocena jest już algorytmem decyzyjnym rys. 23 [141].



Rys. 23. Związki przyczynowo-skutkowe przy ocenie jakości

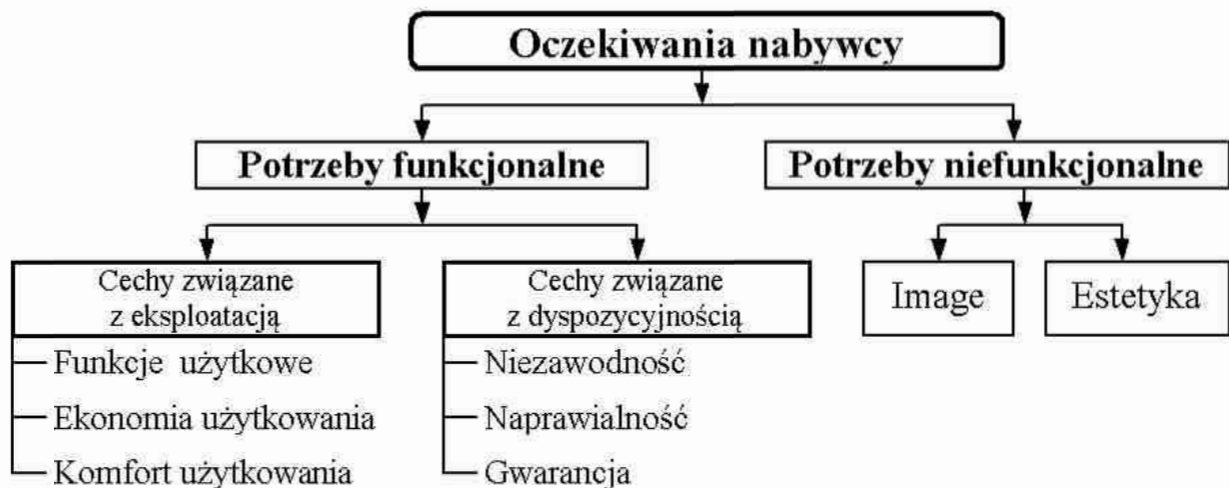
Fig. 23. Casual-effect connections at quality assessment

Z punktu widzenia prakseologii wyróżnić trzeba co najmniej trzy racje: celowości technicznej (ZC), informacyjną (ZF) i podejścia procesowego (ZP). Złożenie tych racji w całość, przy postępowaniu ocenowym, nazywane jest analizą kwalitonomiczną i daje kompleksową ocenę jakości danego wyrobu [67]. Analiza ta zmierza do badania jakości przez ilościowe określanie stanów wybranych kryteriów, a jej podstawowe etapy są analogiczne do podstawowych etapów procesu sterowania. Pozwala to na interpretowanie jej jako sterowania

kwantyfikacyjnego [69]. W podejściu tym chodzi więc nie o jakość, ale o „znaczenie jakości”. Pojęcie to określa, że jest „ktoś” (jakiś podmiot), dla którego ten środek ma określoną „dobroć” (wartość) ze względu na „coś” (kryterium). Przyczyną wielu niepowodzeń produkcyjnych bywa jednak wadliwe rozumienie tego, co stanowi „dobro” dla danego człowieka [71].

W odniesieniu do środków technicznych definiuje się „dobro” jako czyn – działanie właściwe dla danego przedmiotu, racjonalne z punktu widzenia logiki i służące człowiekowi [71]. Ale już ponad 300 lat temu Baruch Spinoza (1632 – 1677) pisał: „rzeczy same w sobie nie są ani dobre, ani złe. Jedna i ta sama rzecz może być bowiem jednocześnie dobra i zła, a także obojętna. Stają się dobrymi, gdy przynoszą ludziom pożytek, złymi gdy mu szkodzą. Dobro i zło wyrażają jedynie stosunek człowieka do przedmiotu, nie stanowią zatem ich obiektywnych cech.” [148]. Zatem jakość określonego wyrobu jest wartością względną i związaną zarówno z cechami jak i z przeznaczeniem tego wyrobu.

Potencjalny nabywca danego wyrobu ocenia go jako pewną całość – nie kupuje jednak cech danego wyrobu, ale pożytek (korzyść), jaki z niego będzie miał. To, czym ten wyrób jest, jak działa, jest dla niego ważne tylko o tyle, o ile te właśnie cechy odpowiadają na następujące pytanie: „w jaki sposób to może mi pomóc w rozwiązaniu określonych problemów [63]. Liczą się więc dla niego potrzeby, które może zrealizować przez nabycie danego wyrobu i są to zarówno potrzeby funkcjonalne, jak i niefunkcjonalne – rys. 24 [140].



Rys. 24. Pojmowanie jakości przez nabywcę wyrobu

Fig. 24. Buyer's approach to product quality

Wszystkie te potrzeby składają się w głowie potencjalnego klienta na obraz jakościowych oczekiwań w stosunku do danego wyrobu i tego poszukuje on na rynku. Świadomie lub nie zadaje sobie pięć on pytań, które określają pięć aspektów postrzegania przez niego jakości [44]:

1. Czego mogę oczekiwać kupując produkt? – specyfikacja wyrobu lub usługi.
2. Czy to jest to, czego się spodziewam? – zgodność cech wyrobu z ich opisem.
3. Czy przez cały czas spełnione będą moje oczekiwania? – niezawodność.
4. Ile muszę zapłacić? – czyli porównawcza wartość produktu.
5. Kiedy to dostanę? – termin dostawy.

Na każdy wyrób składa się duża liczba cech jakości. W zależności od potrzeb inne właściwości wyrobu mogą być istotne dla różnych użytkowników. Należy też pamiętać, że „cechy i właściwości wyrobu nie są pojęciami statycznymi i podlegają zmianom wraz z upływem czasu” [20].

Biorąc powyższe rozważania pod uwagę i wychodząc z przesłanki, że definicja, w sensie opisowym nie powinna określać miary (stopnia) tego „czegoś” ale samą cechę (właściwość), pozostawiając jednocześnie swobodę w zakresie wyboru miary i wskaźnika oceny, proponuje się określenie:

„Jakość jest to zdolność obiektu do wywołania satysfakcji u odbiorcy”.

Tak sformułowana definicja zgodna jest z postulatami E. Deminga o uwzględnianiu czynnika psychologicznego w tworzeniu systemów jakości [74]. Może być zakwalifikowana do psychologicznej teorii wartości [31].

Z takiego podejścia wynika, że jakość nie jest ani w samym wyrobie, ani w odbiorcy. Ona jest tym co łączy (integruje) w jedną całość: wytwór techniczny i wytwór społeczny (człowieka oraz jego potrzebę). Jest wartością względną, bowiem jeżeli zmieni się którykolwiek z tych elementów, zmieni się też i jakość ocenianego wyrobu. Aby mówić o jakości musi więc być zarówno materia (obiekt) o odpowiednim potencjale sprawczym Q , jak i człowiek ze swoją świadomością wzorca (D) tego, czego oczekuje. Dopiero ocena porównawcza daje stopień zgodności z : tego „co jest”, i tego: „co ma być”, czyli:

$$Q = z \cdot D \quad (7)$$

Jakość powstaje zatem z porównania ze wzorcem D (który może być: rzeczywisty D_r , teoretyczny D_t lub umowny D_u), i zmierzyć jej nie można. To, co się daje zmierzyć – nie jest jakością, ale ilością. Można co najwyżej określić natężenie pewnych „inherentnych właściwości”, które będą wzięte pod uwagę przy ocenie i określają potencjał sprawczy (Q) obiektu dla danego działania.

Doświadczenie „satysfakcji” przez użytkownika jakiegoś wyrobu jest skutkiem wielu bodźców, związanych zarówno z samym wyrobem, jak i okolicznościami jego „odbioru” (znaczeniem danego subobszaru jakościowego). Jeżeli

Przejsie wyrobu na kolejny etap realizacyjny transformuje profil sensoryczny jakości na profil techniczny, który ma dwie składowe: jakość typu (projektu) Q oraz jakość zgodności (wykonania) Q_w .

Jakość projektowa Q_p jest zbiorem wartości tkwiącej w rozwiązaniach konstrukcyjnych, wynikających z konkretyzacji potrzeb odbiorcy, i stanowi o klasie wyrobu [31]. Klasa określa potencjał sprawczy danego wyrobu jako środka technicznego i wynika z różnicy między ustalonymi w dokumentacji właściwościami użytkowymi dla danej grupy wyrobów. W zależności od klasy wyrobu może on mieć wyższą lub niższą przydatność użytkową, a tym samym wyższą lub niższą wartość.

Występowanie procesów losowych w trakcie wytwarzania powoduje zróżnicowanie jakościowe cech budowy. Ustala się tym samym wartość dodana, zwana jakością wykonania Q_w . Ten aspekt transformacyjny jakości określa stopień jednorodności „inherentnych” cech w partii wyrobów o tej samej charakterystyce. Im większa zgodność uzyskanych wyników z normą lub wzorcem, tym wyższa wartość dodana. Im większa zgodność uzyskanych wyników z normą lub wzorcem, tym dany proces charakteryzuje się większą wydolnością (zdolnością jakościową) [145].

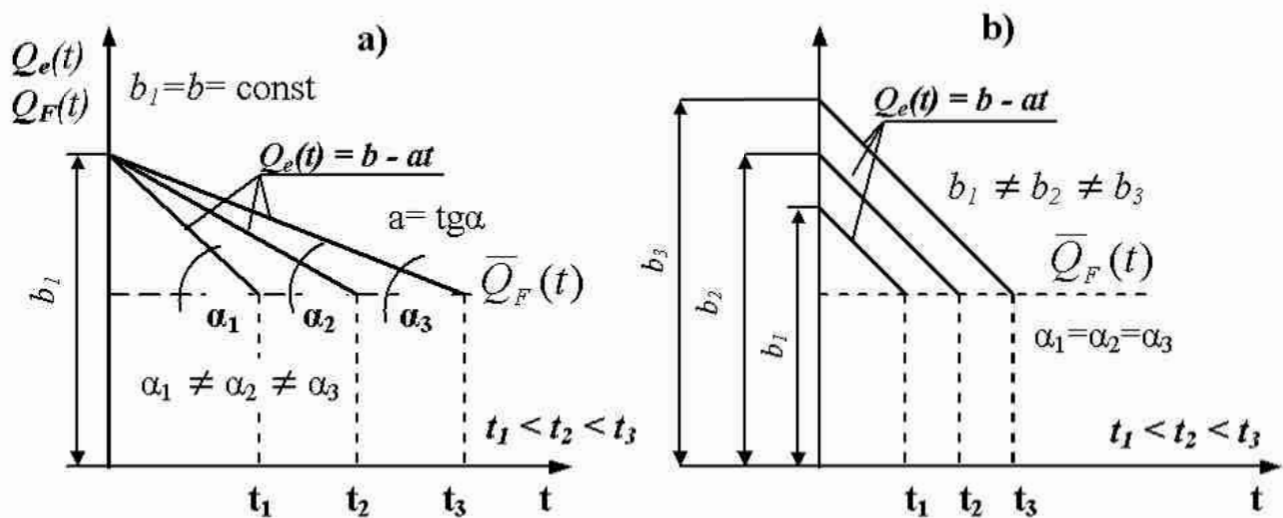
Całkowita zgodność z normami, standardami, lub pisanymi wymaganiami wysokiej klasy nie musi oznaczać, że wyrób jest najwyższej jakości. Może bowiem nie spełniać oczekiwań nabywców, czyli nie mieć jakości eksploatacyjnej (być przydatnym do niczego). Zweryfikować to można jedynie w trakcie użytkowania, gdzie kształtuje się jakość eksploatacyjna (użytkowa) Q_e . Miernikiem wartości dodanej tego aspektu jakości jest przede wszystkim: skuteczność, trwałość i niezawodność [20]. Wartości tych mierników mogą być zatem wykorzystywane do ustalenia indeksu Q_{ISO} .

Występujące procesy zużycia powodują jednak zmniejszanie się wartości tych mierników, a tym samym jakości eksploatacyjnej Q_e . W momencie przekroczenia wartości krytycznych określonych kryteriów następuje całkowita utrata przydatności wyrobu do eksploatacji. tym samym jakość osiąga swój stan zerowy. Oznacza, że wyrób wyczerpał swój okres trwałości T i będzie nieskuteczny w działaniu. Konsekwencją tego stanu jest albo jego złomowanie, albo przywrócenie pierwotnej wartości poprzez proces odnowy. Jeżeli podany jest czas wykonania określonego zadania (t_m), to z odniesienia go do trwałości narzędzi T_k (liczonej ze względu na określone kryterium) można szacować pewność wykonania danego zadania przez partię narzędzi o określonej charakterystyce. Właściwym narzędziem ku temu jest teoria niezawodności [4].

Ogólnie rzecz biorąc, zadanie operacyjne zostanie wykonane, jeśli spełniany jest warunek $T_k \geq t_m$. W przeciwnym wypadku zadanie nie będzie wykona-

ne, co tworzy problem techniczny. Aby go rozwiązać, należy przeanalizować model opisujący funkcję jakości użytkowej Q_e .

W przypadku narzędzi ściernych elementem podlegającym procesom zużycia, pod wpływem zmiennych obciążeń $Q_F(t)$, jest ziarno ściernie o odporności wewnętrznej $Q_e(t)$. Ziarno to może ulec uszkodzeniu nagłemu (jeśli nastąpi przekroczenie wytrzymałości doraźnej lub ścieraniu się do czasu t_k (osiągnięcia określonego kryterium zużycia). Uszkodzenia ziaren są zdarzeniami losowymi, bowiem zarówno wartości obciążeń są losowe, jak i odporność wewnętrzna ziaren też jest losowo zmienna [8]. W ogólnym podejściu wartość funkcji $Q_e(t)$ może być opisana modelem liniowym o postaci $Q_e = b - at$, gdzie „ b ” jest stałą zależną od jakości technicznej ($Q_p + Q_w$), natomiast wartość „ a ” jest stałą materiałową i określa intensywność procesów zużycia w tym materiale [135]. Zmieniając wartości tych składników można wpływać na różny czas pracy ziaren, a tym samym na trwałość ściernicy – rys. 26 [135].



Rys. 26. Model działań zwiększających niezawodność:

a) zmianę intensywności zużycia, b) przez zmianę jakości technicznej

Fig. 26. Model of actions to increase reliability:

a) by change in wear rate, b) by change in technological quality

Rzeczywistą postać opisu procesu uszkodzania się narzędzia można uzyskać przeprowadzając odpowiednie badania. Na opis ten będą się składały liczby, wynikające z wartości przyjętych wskaźników oceny [102]. W każdym przypadku wskaźniki te są związane funkcyjnie z trwałością T danego narzędzia. W przypadku eksploatacji zbioru jednakowych narzędzi (procesy powtarzalne) parametr ten jest wartością losową, a tym samym losową wartością jest jakość użytkowa Q_e . Jej ocena sprowadza się więc do oceny działania, w które uwikłany jest dany środek [159]. Działanie to jest uzależnione od układu powiązań systemowych [149]. Powiązania te w opisie matematycznym wyrażane są

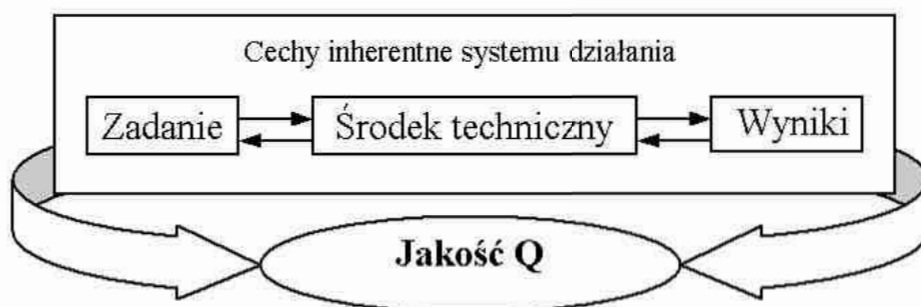
przez funkcję niezawodności R [4]. Funkcja niezawodności, jako cecha procesowa określana prawdopodobieństwem, jest więc logiczną podstawą wyznaczania stopnia przydatności danego środka technicznego do wykonania postawionego zadania. Tym samym jest miarą jakości, czyli zdolności danego wyrobu do spełniania postawionych wymagań.

1.5. Model systemowej oceny jakości narzędzi ściernych

Narzędzie ściernie – jako środek techniczny – jest obiektem zadaniowym. Oznacza to, że projektowane i wykonywane jest do określonego zadania i układu obróbczego. Mówiąc inaczej, stanowi element pewnej zorganizowanej całości, nakierowanej na określony cel, czyli systemu. Z tego też względu do oceny jakości tego typu obiektów uprawnione, a w istocie rzeczy najbardziej słuszne, jest ujęcie systemowe [141].

To, czy dany obiekt jest dobry czy zły, zależy nie tylko od jego cech (istotnych), ale także od tego: jakie są wymagania, kto je stawia, kto i jak wykonał ten przedmiot? itp. Mówiąc językiem systemowym: od elementów tworzących system i sprzężeń między nimi. Podkreśla to wyraźnie L. Dwiliński sformułowaniem: „jakość obiektu technicznego można ocenić stosując oceny syntetyczne ujmujące zachowanie się obiektu w systemie – oceny takie nie mogą być przenoszone na obiekty występujące poza systemem. Oceny syntetyczne wynikają z funkcji obiektu i nie mogą być stosowane niezależnie od nich” [20].

Jeszcze dobitniej stwierdzał to E. Deming, twórca współczesnego zarządzania jakością, że: „nie ma czegoś takiego jak prawdziwa wartość. Są tylko wyniki określonej procedury” [74]. Z tego wynika, że kategorie cechy i jakości można (i należy) odnosić do wszystkich składników układu działania, bowiem jakość nie istnieje w przedmiocie. Jakość – to cecha przypisana systemowi rys. 27.

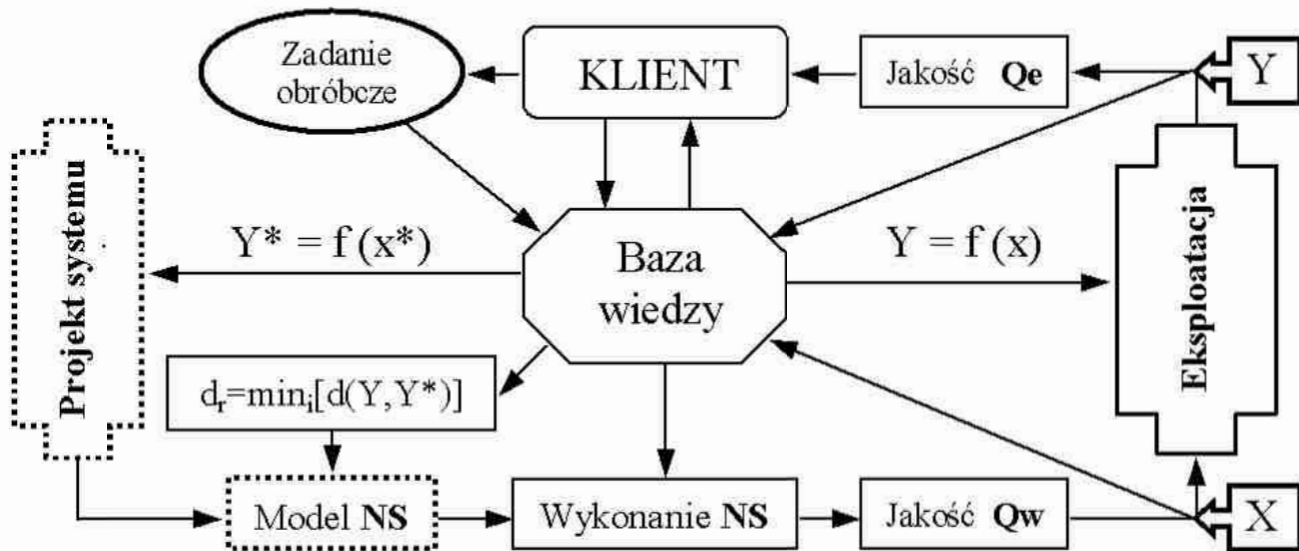


Rys. 27. Model jakości jako cechy przypisanej systemowi

Fig. 27. Quality model as system feature

Ocena jakości Q to zbiór elementów zmierzających do sformułowania sądu wartościującego co do stanu zdadności określonego narzędzia ściernego w przyjętym systemie działania. O jakości obiektu w systemie (cel badania) można

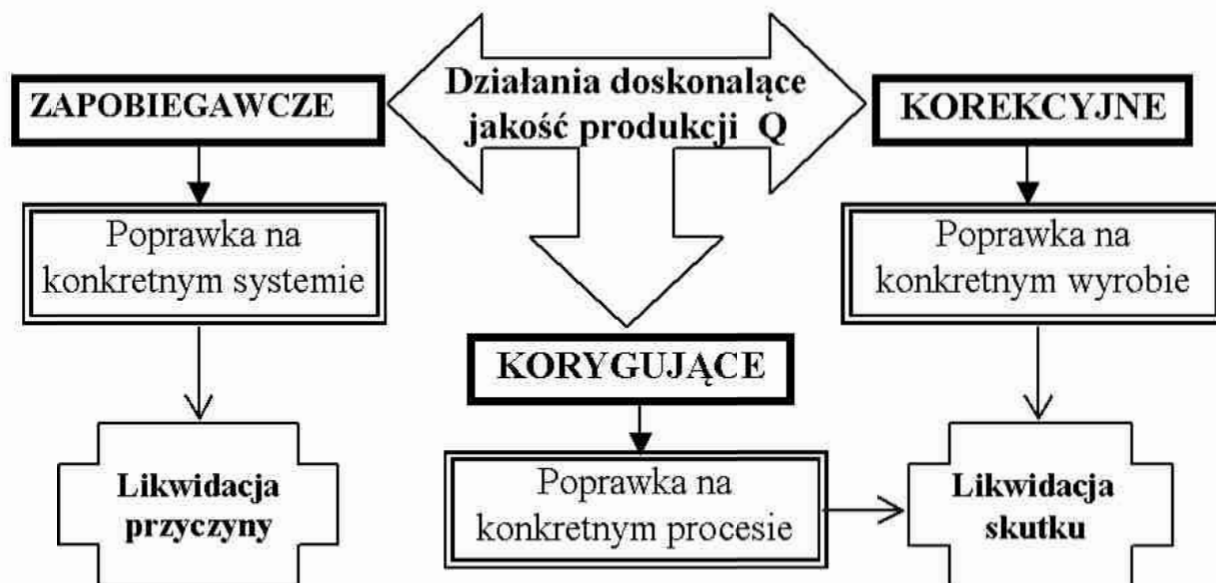
więc mówić, gdy się bierze pod uwagę przypisane mu wymagania i oczekiwania oraz jego własności inherentne, określające jego potencjalne zdolności do spełniania tych wymagań. Celem analizy systemowej jest zatem ustalenie modeli matematycznych wiążących dane na wejściu (zadanie) i wyjściu z systemu (wyniki). Dane te są niezbędne do symulacji i działań doskonalących system [21]. Strukturę postępowania w tym zakresie przedstawiono na rys. 28.



Rys. 28. Model analizy systemowej przy ocenie jakości narzędzi ściernych
Fig. 28. Model of system analysis at quality assessment of abrasive tools

Początkiem procesu działań jest określona potrzeba, wyznaczająca zadanie. Do realizacji tego zadania budowany jest odpowiedni system operacyjny, w którym występują działania organizatorskie i działania robocze. Działanie organizatorskie polega na wstępnym doborze charakterystyki technicznej narzędzia (jako modelu Y^*) do postawionych zadań oraz przyjętego systemu operacyjnego. Realizując działanie systemowe spełnia się warunek $d_i = \min_i[d(Y, Y^*)]$, czyli poszukuje takiego stanu, aby różnica pomiędzy wzorcem (Y^*) dotyczącym danej użyteczności, a jego wartością rzeczywistą była jak najmniejsza. Potencjalną jakość „typu” (projektowaną Q_p) można określić przez podanie zbioru parametrów modelowych (X^*) w postaci charakterystyki technicznej. Parametry tego zbioru podczas procesu wykonania narzędzia stają się wartościami losowymi. Najważniejsze z nich są badane i określają jakość wykonania Q_w . Winna być ona mierzona, bowiem stanowi wielkość wejściową (X) procesu obróbki. W procesie eksploatacji dokonuje się transformacja jakości wykonania narzędzia na jego jakość użytkową Q_e , opisywaną zbiorem wielkości wyjściowych (Y). W systemie szukamy rozwiązania maksymalizującego użyteczność $Q_e = f(Q_w)$. Podstawowym modelowaniem systemowego jest więc dostarczenie modeli postępowania w postaci syntetycznych wskaźników (mierników) jakości, które speł-

niając warunek formalnej poprawności dawałyby merytoryczne uzasadnienie działań doskonalących jakość produkcji. Patrząc systemowo, działania te można podzielić na trzy rodzaje – rys. 29.



Rys. 29. Model systemowy działań doskonalących jakość produkcji

Fig. 29. System model of actions improving quality of manufacturing

Działania *korekcyjne* mają na celu wyeliminowanie zaistniałej niezgodności jakościowej na konkretnym wyrobie. W przypadku narzędzi ściernych będzie to np. ich obciążanie, przywracające ich początkowe właściwości użytkowe.

Działania *korygujące* dotyczą zmian jakościowych w całym procesie, np. zmiana parametrów obróbki, prowadząca do zmniejszenia zużycia narzędzia.

Działania *zapobiegawcze* dotyczą zmian przedprocesowych w systemie i mają likwidować przyczynę, a nie skutek zaistniałej odmienności. Opierają się więc na przyjęciu określonej strategii postępowania, prowadzącej do zapewnienia przez system określonej jakości.

Wyeliminowanie błędu (działanie korygujące) lub niezgodności w jakimś procesie (działanie korekcyjne) nie stanowi jednak udoskonalenia, lecz tylko przywrócenie stanu normalnego. Likwiduje bowiem skutek, a nie przyczynę.

Działania zapobiegawcze to wykrywanie potencjalnych zakłóceń i doprowadzenie do tego, aby one w ogóle nie wystąpiły. Ten rodzaj działań projakościowych należy więc uznać za najbardziej właściwy i dlatego stał się celem prowadzonych badań.

W ujęciu systemowym istnieje kilka poziomów wyjaśniania zachowania się każdej „zorganizowanej” całości. W pewnym sensie wszystkie one są prawdziwe, ale użyteczność ich dla opisu danego działania jest zróżnicowana. Najwyższą rangą jest system operacyjny, a jego elementy mimo tego, że też są „zorgani-

wanymi całościami”, traktowane są jako „podsystemy”, których wewnętrzna struktura jest projektowana ze względu optymalny cel działania systemu nadrzędnego. Przy ustalaniu ocen jakościowych narzędzia ściernego istotne znaczenie ma więc porządek działań: od właściwości do własności, od osiągnięć eksploatacyjnych do cech konstrukcyjnych.

W analizach systemowych dotyczących jakości zaleca się branie pod uwagę ośmiu zasad postępowania metodycznego [31]. Zasady te, po opracowaniu własnym, pokazano w sposób graficzny na rys. 30.



Rys. 30. Model podejścia metodycznego przy systemowej ocenie jakości
Fig. 30. Model of methodological approach at system quality assessment

Na zasadach tych oparta została koncepcja metodyczna realizowanych badań. Ich zamierzeniem jest identyfikacja określonego aspektu jakości ściernic ceramicznych na podstawie wartości wyodrębnionego kryterium.

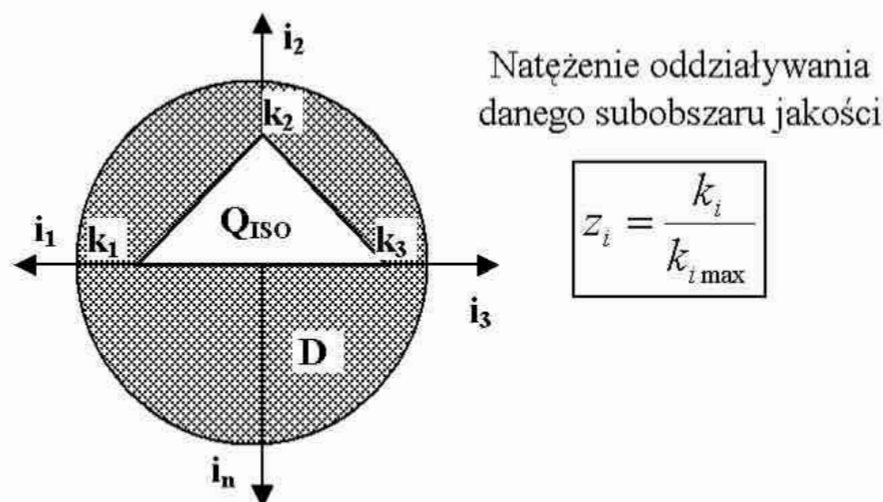
Systemowo rzecz biorąc, jakość jest przestrzennym rozkładem natężenia różnych racji, które są podstawą oceny wielokryterialnej. W działalności technicznej i naukowej racje winne być wyartykułowane w postaci definicji operacyjnych, które obejmują: metodę badania, kryteria i decyzję. Kryterium więc nie jest trafne lub nietrafne (dobre lub złe); jest jedynie z góry ustaloną regułą. [74]. Ze stawianiem wymagań w postaci kryteriów łączy się ściśle potrzeba ich kontroli, a więc potrzeba określania stopnia ich spełnienia, czyli określania poziomu jakości. Poziom ten jest standaryzowany wskaźnikiem Q_{EO} , zależnym od przyjętej metody badania i zestawu kryteriów. Podjęcie decyzji operacyjnej (funkcja optymalizacyjna prowadzonej analizy) umożliwia jednak nie sama wartość liczbowa tego wskaźnika, ale znajomość charakteru funkcji wartościującej cechy kwantytatywne. W tym zakresie wyróżnia się: maksymanty, minimanty i nominanty [31].

Ogólnie biorąc subobszary jakościowe, wyznaczające określony punkt widzenia (rację) mogą być związane z: przeznaczeniem, wykonaniem, użytkowaniem, ekonomiką i doznaniowym oddziaływaniem na człowieka [69].

Z zestawu uniwersalnych kryteriów ważności do analizy kwalitonomicznej ściernie winne być wykorzystywane (jako szczególnie ważne) następujące kryteria [68]:

1. *Bezpieczeństwo (B)* – dotyczące życia lub zdrowia człowieka,
2. *Skuteczność (S)* – informujące o właściwym spełnianiu danych zadań,
3. *Niezawodność (N)* – informujące o pewności wykonania tych zadań,
4. *Korzyść (K)* – informujące o osiągniętych korzyściach lub efektach,
5. *Wadliwość (W)* – informujące o stopniu zgodności z założeniami

Wymóg bezpieczeństwa (B) jest poza dyskusją. Kryterium to dotyczy cech krytycznych każdego urządzenia i muszą być one bezwzględnie spełniane [17]. Pozostałe kryteria tworzą zbiór wymagań określających jakość użytkową, czyli jakość z punktu widzenia satysfakcji odbiorcy. W konkretnym przypadku mogą być zachowane te, które są istotne dla prowadzonej analizy. Istotność ta może być ustalona np. na podstawie zasady 20/80. Zasada ta, oparta na ustaleniach V. Pareto głosi, że w „każdej całości zwykle 80% skutków jest wynikiem 20% przyczyn i odwrotnie” [66]. Zatem nie jest celowe rozbudowywanie analizy jakościowej wyrobu o oceny z dużego zbioru czynników jakościowotwórczych. Z założeń systemowych wynika, że powinno się uwzględniać minimum 3 takie subobszary – rys. 31 [140].



Rys. 31. Model miary jakości w ujęciu systemowym

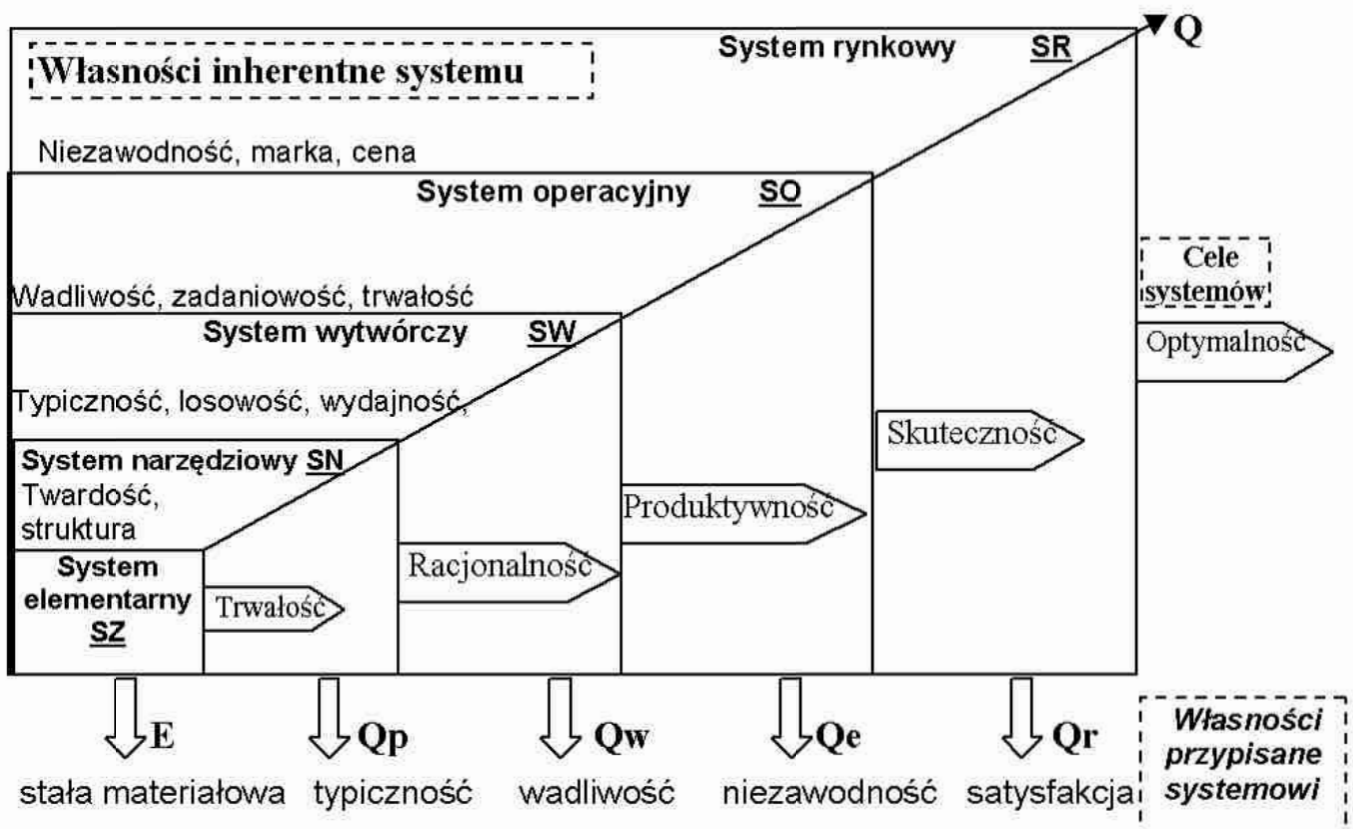
Fig. 31. Model of quality measurement at system approach

Stosunek pola Q_{ISO} , objętego zestandaryzowanymi (dla danego działania) kryteriami jakości (k_i), do pola D , wynikającego z wzorcowych wartości tych kryteriów ($k_{i,max}$), określa stopień z , będący miarą systemowej oceny jakości:

$$z = \frac{Q_{ISO}}{D} \quad (9)$$

Jeżeli wybrane kryteria jakości (k_i) wyrażone są w różnych mianach, to najpierw trzeba je sprowadzić na jedną wspólną skalę. Postępowanie w tym zakresie jest znane, zwłaszcza z prac R. Kolmana [68]. W odniesieniu do narzędzi ściernych zostało przedstawione w pracy autora [132].

Stosując podejście procesowe, należy jednak wziąć pod uwagę kinetykę zmian jakościowych, czyli zdarzeń polegających na pojawianiu się lub znikaniu określonych cech [20]. Zmiany te są uwarunkowane przyczynowo i mają swoją dynamikę w cyklu produkcyjnym, dlatego też w kwalitologii wyodrębnia się określone aspekty jakości (p. rys. 25). Przesłanką do ustalania tych aspektów jest faza procesu przemian cech kwantytatywnych, którym podlega badany przedmiot. W każdej z tych faz występuje inna grupa problemów jakościowych, wymagających odrębnej analizy [31]. Proces produkcyjny jako system przebiega dzięki współpracy tych podsystemów, nazywanych funkcjami. Zakłócenia w pracy jednego z podsystemów wpływają na zakłócenia całego systemu [79]. Biorąc to pod uwagę, w prowadzonej analizie niezbędne było wyróżnianie podsystemów dla poszczególnych faz cyklu istnienia badanego obiektu. Dzięki takiemu ujęciu otrzymano wielowymiarowość jednej rzeczy, czyli spójny wizerunek zagadnienia badawczego – rys.32.



Rys. 32. Charakterystyka systemów fazowych narzędzi ściernych

Fig. 32. Characteristic of phase systems of abrasive tools

Najniższy rangą jest system elementarny SZ, tworzony na poziomie materiałowym: ziarna ściernego (*Z*) i spoiwa (*S*). Jego własnością inherentną jest np. skład krystalograficzny tych materiałów, a przypisaną (wynurzającą się ze struktury krystalograficznej) jest określona stała materiałowa, np. moduł sprężystości wzdłużnej *E* (Younga) [105].

Do fazy konstruowania (projektowania) narzędzia przynależny jest system narzędziowy SN. Cechy inherentne tego systemu (twardość, struktura) są konsekwencją wyboru określonego składu recepturalnego, a cechą przypisaną jest typiczność narzędzia. Przyjmuje się przy tym, że „typiczność” dotyczy struktury przedmiotowej, którą tworzy świadomość w przepływie intencjonalnej syntezy projektowej [41]. Projekt określonej struktury wewnętrznej obiektu jest jednak tylko modelem (intencją) przedsięwzięcia, mającego się urzeczywistnić w przyszłości. Typiczność strukturalna staje się więc swego rodzaju medium z wpisanym komunikatem o intencjach projektanta, dotyczących jakości typu Q_p . Mieści się w niej swego rodzaju „wiązka” właściwości technicznych, użytkowych i ekonomicznych. G. Nadler, autor modelu „idealnego wzorca”, postuluje, aby w każdym rozwiązaniu projektowym problemę stanowił teoretyczny system idealny, którego kryteriami są: minimum kosztów, niezawodność, prostota, równomierność, regularność działania, lub optymalna realizacja postawionych zadań [90].

W fazie wytwarzania idea konstrukcji narzędzi zostaje zamieniona w czyn. Do opisu związków przyczynowo-skutkowych w tej fazie potrzebny jest system wytwarzania SW. Celem istnienia tego systemu jest produktywność. Jego cechami własnymi (inherentnymi) są: typiczność strukturalna wytwarzanego narzędzia, wydajność oraz udział czynników losowych. U źródeł losowości leży w dużej mierze losowość cech samego ziarna ściernego, spoiwa oraz duży udział czynników przypadkowych procesu wytwarzania [122]. Stopień wadliwości wytwarzanych wyrobów jest podstawą określenia jakości wykonania Q_w . Ten aspekt jakości dotyczy więc jednorodności wyrobów wytwarzanych w danym procesie i opisuje wydolność jakościową tego procesu.

Jakość typu Q_p i jakość wykonania Q_w są kategoriami kwantytatywnymi formalnie rozłącznymi [44]. Fakt ten wykorzystuje się do celów analitycznych, budując określone normy jakości [56]. Niedostatki jakości typu tylko w niewielkim stopniu mogą być zrównoważone wysoką jakością wykonania, i odwrotnie, wysoka jakość typu nie równoważy niskiej jakości wykonania [20]. Zadaniem działań w obszarze jakości jest więc przede wszystkim troska o to, by w procesie projektowania uzyskać odpowiednią jakość typu, a następnie jakość tę odtworzyć w każdej jednostce masowo wytwarzanego wyrobu [44].

Wytworzone narzędzie ściernie (jako środek techniczny) w fazie eksploatacji przechodzi do systemu operacyjnego SO, w którym jest użytkowane i obsługi-

wane (odnawiane). Cechą charakterystyczną systemu eksploatacji danego środka technicznego jest to, że jedno z działań, użytkowanie, jest tożsame z działaniem w systemie operacyjnym, tj. wykonywaniem zadania operacyjnego. Tym samym nie można dokonać rozdziału systemu operacyjnego od systemu eksploatacji [70]. Celem systemu operacyjnego jest skuteczne wykonywanie postawionych zadań. Własnościami przynależnymi temu systemowi są więc: rodzaj tego zadania obróbkowego, wadliwość i trwałość zastosowanego narzędzia. Wynikiem synergicznego współdziałania elementów tego systemu jest określona jego niezawodność, która może być wykorzystywana jako miara jakości użytkowej Q_e zastosowanego narzędzia.

O skuteczności eksploatacji narzędzia w danym systemie możemy orzekać na podstawie różnicy uzyskanego wyniku (W) i założonego celu (C). Posługując się funkcją kryterialną (F_c) i operatorem ekstremum (E_{xt}) dla przypadku gdy cel formułowany jest w kategoriach efektu (W_{ef}), eksploatacja narzędzia, jako środek techniczny, jest [102]:

- skuteczna, gdy $W_{ef} \geq C \Rightarrow F_c \geq 0$,
- częściowo skuteczna, gdy $C_0 \leq W_{ef} < C \Rightarrow 0 < F_c \leq C - C_0$ dla $C_0 \leq C$,
- tym skuteczniejsza im wartość F_c jest mniejsza,
- nieskuteczną, gdy $W_{ef} < C_0 \Rightarrow F_c \leq C - C_0$

(przy czym: C_0 jest progową wartością celu, a: $F_c = C - W_{ef}$ i $E_{xt} = \min$.)

Jeżeli funkcja kryterialna ma postać $F_c = W_{ef}$ oraz $E_{xt} = \max$, to można określić efektywność eksploatacji tego narzędzia. Jest: ona:

- efektywna, gdy $W_{ef} > 0 \Rightarrow F_c > 0$,
- tym efektywniejsza, im wartość F_c jest większa,
- nieefektywna, gdy $W_{ef} \leq 0 \Rightarrow F_c \leq 0$.

Niezawodność użytkowania $R_u(t_m)$ narzędzia ściernego jest właściwością jego użytkowania przy założeniu, że czas tego użytkowania (τ) jest zmienną losową ciągłą. Miarą niezawodności jest prawdopodobieństwo tego, że użytkowanie tego środka będzie trwało przez czas nie mniejszy niż (t_m) określony zadaniem [135]. Przy założeniu niezależności stanów elementów składowych łańcucha użytkowania powstaje związek [4]:

$$R_u(t_m) = R_{x1}(t_m) \cdot R_{y1}(t_m) \cdot R_{z1}(t_m) \quad (10)$$

gdzie:

- R_{x1} – niezawodność użytkownika,
- R_{y1} – niezawodność środka technicznego (narzędzia ściernego),
- R_{z1} – niezawodność obrabiarki.

Dla zautomatyzowanej obróbki szlifowaniem dopuszczalne jest przyjęcie założenia o pomijalnie małym wpływie obrabiarki i operatora na niezawodność. Wówczas: $R_{x1}(t_m) = 1$ oraz $R_{z1}(t_m) = 1$ i niezawodność systemu operacyjnego jest tożsama z niezawodnością narzędzia [129]:

$$R_u(t_m) = R_{y1}(t_m) = P(\tau_w \geq t_m) = P(t_m) \quad t_m > 0 \quad (11)$$

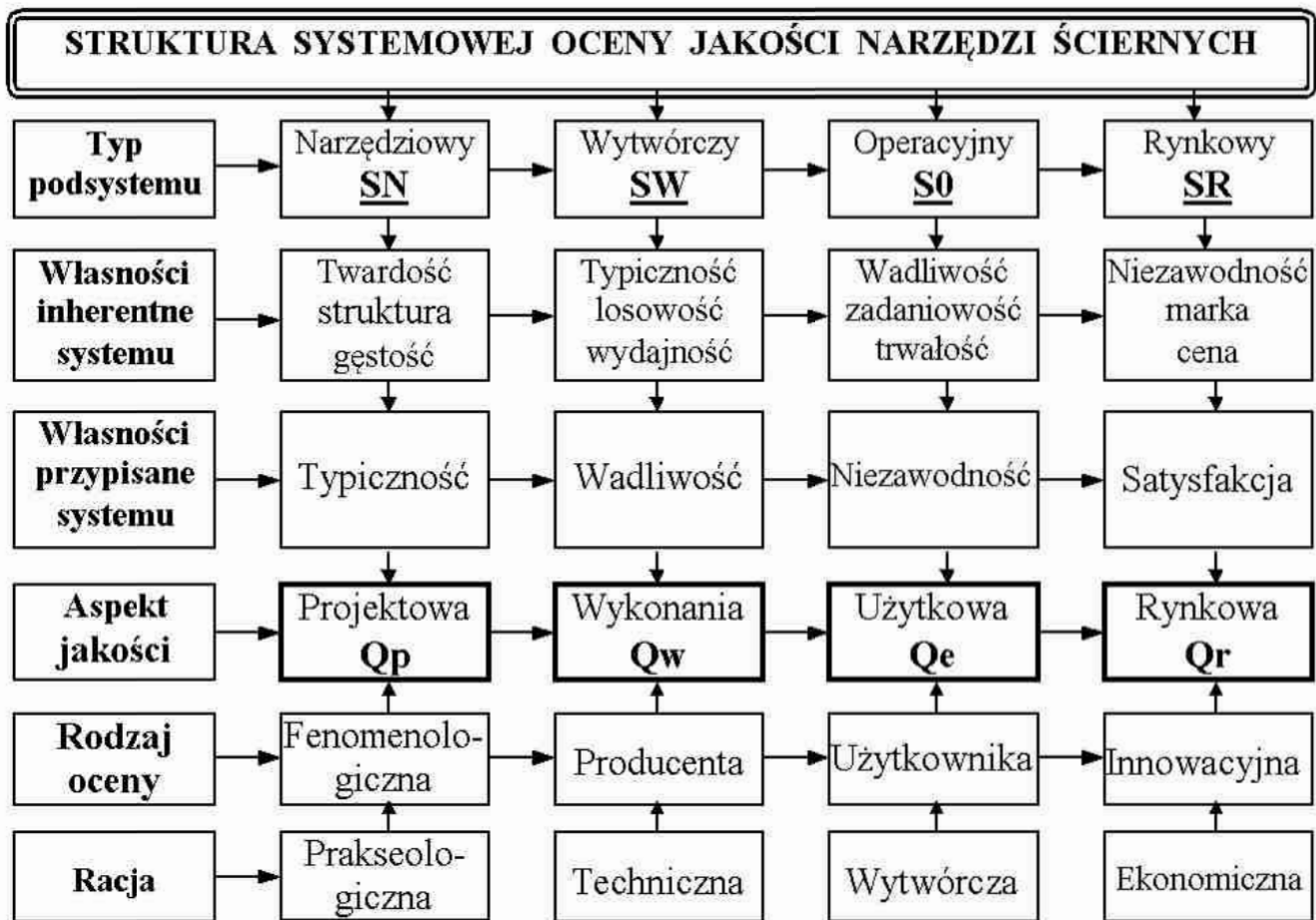
W ogólnym ujęciu ilościowo charakteryzuje się niezawodność podając, prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia polegającego na tym, że obiekt będzie pracował poprawnie (w świetle przyjętych kryteriów) przez ustalony czas (t_m) w określonych warunkach [135].

Niezawodność wyrobów, a w drugiej kolejności trwałość, posiadają istotny wpływ na ogólnospołeczne nakłady. Niezawodność staje się więc jedną z inherentnych cech (obok marki i ceny) określających wbudowanych w system rynkowy *SR*. Uzależnienie w mechanizmie rynkowym cen oraz jakości i niezawodności wyrobów sprawia, że w procesie sprzedaży – kupna występuje obiektywne wartościowanie jakości i niezawodności wyrobów przez ich ceny [44]. Sprawia to, że te cechy procesu operacyjnego danego przedsiębiorcy stają się podstawą działań optymalizacyjnych. Działania te są celem istnienia systemu rynkowego i wymuszone są przez istnienie konkurencji [155].

Taki sposób funkcjonowania rynku wywołuje ekonomiczny przymus jakościowy w przedsiębiorstwach oraz tworzy jakościową konkurencję między nimi. Odpowiednia jakość i niezawodność wyrobów uznawana jest więc za strategiczny cel każdego przedsiębiorstwa [20]. Żądana cena i jakość oferowanego wyrobu są jednocześnie tymi zmiennymi, za pomocą których producent może oddziaływać na stany emocjonalne ludzi (zadowolenie i satysfakcję). Satysfakcję charakteryzuje poczucie nowości, osiągnięcia, spełnienia. Poczucie satysfakcji sprawia pragnienie powtórzenia danego działania [150]. Efektem tego może być ponowny zakup danego produktu przez konsumenta. Satysfakcję można więc uznać za własność przypisaną systemowi rynkowemu.

Przedstawiony model zintegrowanych ze sobą systemów (podsystemów) fazowych jest ujęciem kompleksowym i procesowym. Ujęcie to stanowi podstawę sądu wartościującego wydzielonego stanu jakościowego rozpatrywanego obiektu badań, czyli oceny jakościowej rozpatrywanej kompleksowo. Dla tego typu podejścia ocenowego ważne jest zatem rozstrzygnięcie: z jakiej pozycji (perspektywy) dokonujemy wartościowania, czyli jaka racja przyświeca danej ocenie i jaki jest cel danej oceny. W ten sposób zaakceptowany zostaje podmiotowo-celowy charakter systemu oceny (co?, po co?, dlaczego?) pozostawiając w tym momencie na uboczu przedmiotowo-narzędziowe aspekty zagadnienia (jak?,

gdzie?, kiedy?). Strukturę tak traktowanego orzekania o poszczególnych aspektach jakości narzędzi ściernych przedstawiono na rys. 33.



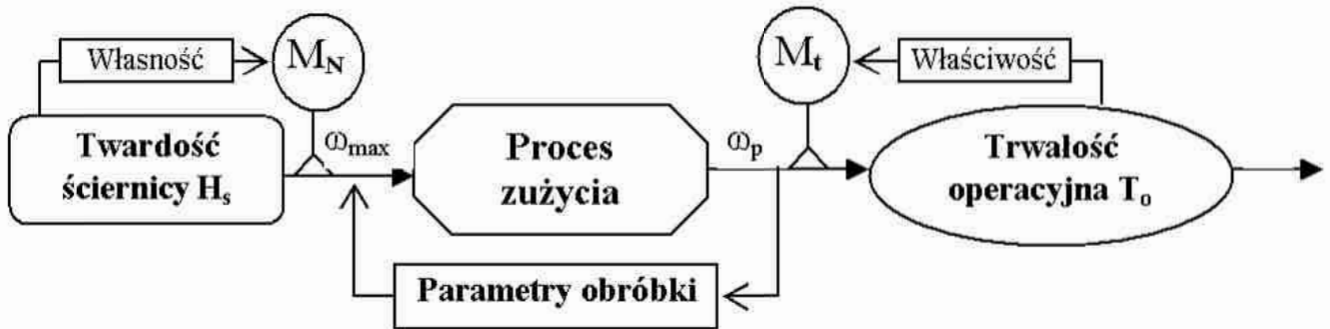
Rys. 33. Struktura podejścia systemowego do oceny jakości narzędzi ściernych

Fig. 33. Structure of system approach to quality assessment of abrasive tools

Narzędzie ścierne jako obiekt techniczny, w każdej chwili znajduje się w pewnym określonym stanie. Stan techniczny jest definiowany w kategoriach określonego aspektu jakości przez wektor miar bezpośrednich lub pośrednich. Miary bezpośrednie określają jego cechy strukturalne (związane z jakością typu Q_p i jakością wykonania Q_w). Miary pośrednie (nazywane symptomami) opisują zaawansowanie procesów zużycia i dotyczą jakości użytkowej Q_e [158]. Zatem: dokonując oceny – analizujemy pewne zewnętrzne cechy narzędzia, które w każdym przypadku mogą być rozpatrywane jako objaw jakiegoś stanu. [102].

Stan statyczny opisuje własność, czyli teoretyczną intensywność działania ω_{max} tego narzędzia i określany jest miernikiem M_N . W wyniku zmian procesowych, związanych z procesami zużycia, ustala się rzeczywista intensywność działania ω_p , która jest właściwością użytkową tego narzędzia w danym systemie operacyjnym SO . Określić ją można według symptomów, z miernika M_t , podczas diagnostyki eksploatacyjnej. Jeżeli przyjmiemy, że działanie systemu

operacyjnego obróbki ścierniej jest zinstrumentalizowane ściernicą, to powiązanie pomiędzy stanami tego narzędzia pokazano na rys. 34.



Rys. 34. Model systemowy kształtowania się stanów technicznych ściernicy
Fig. 34. System model for shaping technological conditions for grinding wheels

Symptomy jako objawy stanu technicznego są czynnymi cechami sygnałów diagnostycznych i odwzorowują określony typ uszkodzenia [159]. Jeżeli na symptomy te nałożone zostaną ograniczenia procesowe, to zostaje określona trwałość operacyjna T_o . Stany statyczne i kinematyczne opisuje zależność [24]:

$$\omega_p = k_t \cdot k_N \cdot \omega_{\max} = \frac{W}{T_o}, \quad (12)$$

gdzie:

- W – wynik działania,
- k_t – współczynnik wykorzystania okresu trwałości narzędzia,
- k_N – współczynnik wykorzystania jego cech znamionowych (projektowych).

Przekształcając zależność (12) otrzymamy wynik działania W tego narzędzia:

$$W = \omega_{\max} \cdot k_t \cdot k_N \cdot T_o \quad (13)$$

Jeżeli wynik ten uzyskiwany jest w warunkach czasu i intensywności użytkowania określanych z wyboru kryterialnego lub decyzyjnego, to jest on jednoznaczny ze zdolnością użytkową (jakością Q_e) tego narzędzia. Zdolność użytkowa zależy zatem zarówno od projektowanych cech budowy narzędzia (jakości Q_p i Q_w), jak i intensywności procesów zużycia w danym systemie operacyjnym SO , będących funkcją parametrów obróbki.

Zbiór najistotniejszych cech, określających potencjalną zdolność użytkową, nazywa się charakterystyką techniczną [19]. Do najistotniejszych cech charakterystyki technicznej narzędzi ściernych zalicza się twardość [14], jest to bowiem

cecha systemowa, określająca intensywność procesów zużycia. Do wyznaczenia wartości liczbowych tej cechy opracowano wiele różnych kryteriów i metod pomiaru. Systemowe ujęcie tych metod oraz sposób wyznaczania syntetycznego wskaźnika, przyjętego do systemowej oceny jakości ściernic ceramicznych, przedstawiono w kolejnym rozdziale pracy.

ROZDZIAŁ 2

DIAGNOSTYKA KONTROLNA ŚCIERNIC CERAMICZNYCH

We współczesnym rozumieniu systemową ocenę jakości należy rozumieć w szerokim kontekście strategii projakościowych, obejmujących: zarządzanie przez fakty, zarządzanie przez cele oraz zarządzanie procesowe [141]. Fakty te uzyskuje się na podstawie pomiarów istotnych cech wyrobu podczas badań diagnostycznych. Pomiary jakości są domeną kwalimetrii [31].

2.1. Analiza metod diagnostyki kontrolnej ściernic ceramicznych

Efektywność pomiarów kwalimetrycznych opiera się na wykorzystywaniu skutecznych procedur diagnostycznych, związanych z przebiegiem procesu rozpoznawania stanu danego kryterium jakościowego. Skuteczność ta w pierwszym rzędzie zależy od systemowego podejścia do procesu diagnostycznego [12]. Systemowo rzecz biorąc, w rozpoznawaniu stanu dowolnego obiektu poszukuje się odpowiedzi na 4 podstawowe pytania [159]. Pytania te tworzą podstawową strukturę procesu diagnostycznego rys. 35.



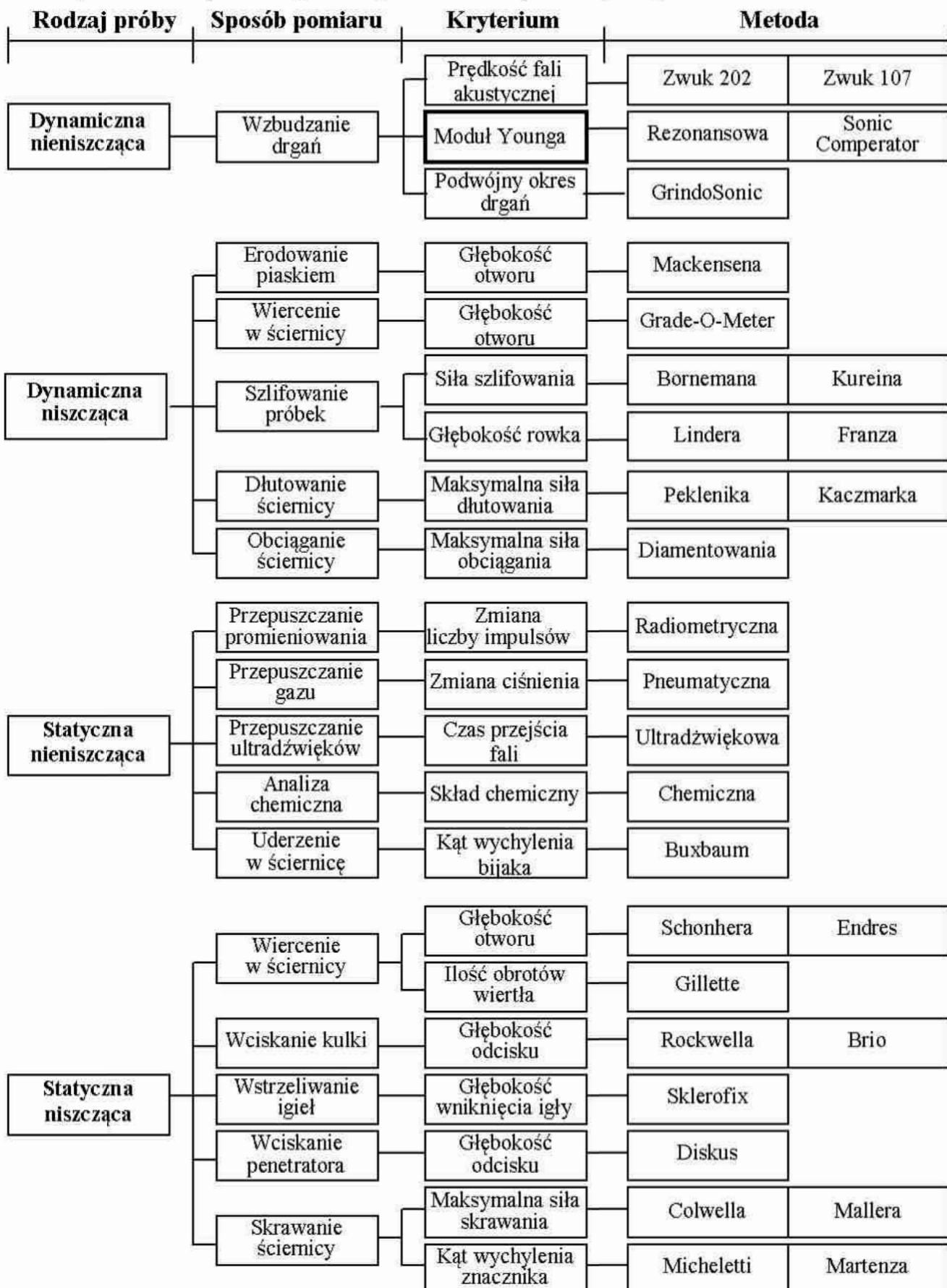
Rys. 35. Model systemowy procesu diagnostycznego narzędzi ściernych

Fig. 35. System model of diagnostic process for abrasive tools

Kryterium identyfikacji winno odnosić się do stanu najistotniejszych cech badanego wyrobu. W zakresie narzędzi ściernych o konwencjonalnej budowie takimi cechami są twardość i struktura [122]. Praktycznie jednak wszystkie metody diagnostyki kontrolnej tych narzędzi odnoszą się do ich twardości [58]. Jest ona związana z udziałem objętościowym por V_p i stopniowana według skali Nortona [45]. Według tej skali kryterium identyfikacyjnym twardości jest określona litera alfabetu (E.F.G.) – ją należałoby zatem mierzyć.

Każda litera alfabetu łacińskiego jest znakiem symbolicznym, a symboli się nie mierzy. Symbol bowiem nie przedstawia realnej wartości, to „znak umowny, pełniący funkcję zastępczą wobec pewnego stanu rzeczy” [65]. Opracowano

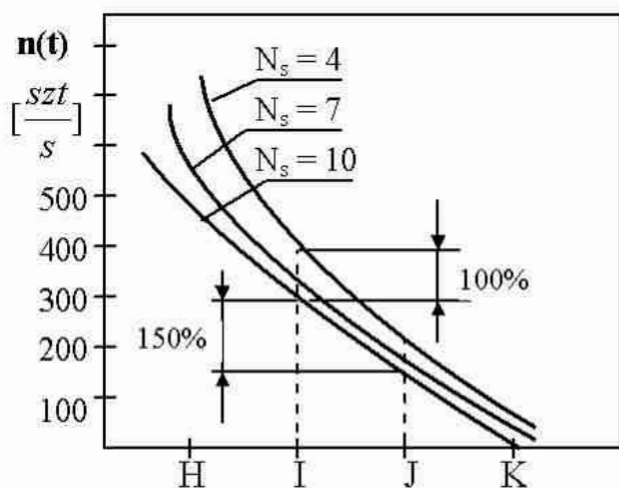
zatem wiele różnych metod pomiaru, które „próbują” diagnozować twardość narzędzi ściernych w sposób pośredni – rys. 36 [123].



Rys. 36. Systemowe ujęcie metod badań twardości narzędzi ściernych

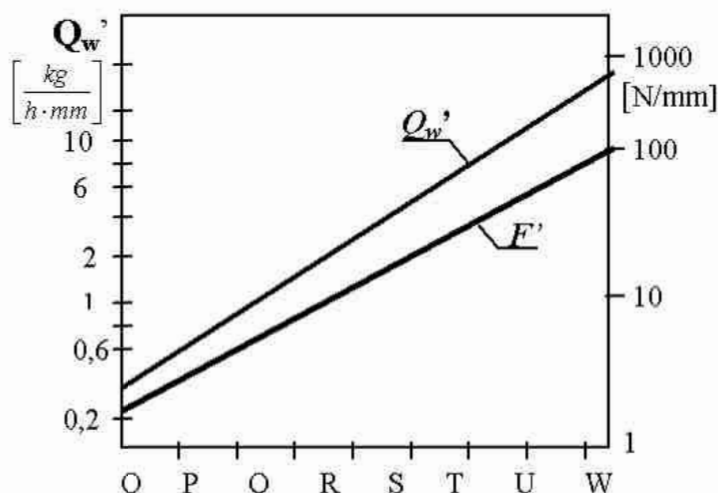
Fig. 36. System approach to abrasive tool hardness testing methods

Zestawione metody koncentrują się na badaniach twardości, bowiem od tej cechy budowy narzędzi ściernych znacznie silniej zależy intensywność wykruszeń ziaren ściernych niż od ich struktury (drugiego parametru systemowej budowy). Przykładowo: zmiana twardości o jeden stopień, według skali Nortona, powoduje zmianę ilości wykruszeń rzędu 150%. Są to zmiany 2–3 razy większe niż przy zmianie struktury aż o 6 numerów – rys. 37 [127]. Twardość wpływa też w sposób zdecydowany na inne parametry wyjściowe procesu szlifowania, np.: wydajność ubytkową i siłę szlifowania – rys. 38 [7].



Rys. 37. Wpływ twardości ściernic na intensywność wykruszeń ziaren

Fig. 37. Influence of abrasive wheel hardness on grain spalling intensity



Rys. 38. Wpływ twardości ściernic na wydajność ubytkową Q_w' i siłę szlifowania F'

Fig. 38. Influence of abrasive wheel hardness on material removal rate Q_w' and grinding force F'

Opracowane metody badania twardości ogólnie można podzielić na niszczące i nieniszczące, wśród których wydzielić można metody statyczne i dynamiczne. Metody te różnią się między sobą zarówno rodzajem próby, sposobem pomiaru, jak i przyjętym kryterium oceny jakościowej. Większość z tych metod nie gwarantuje otrzymania dokładnych i niezbędnych informacji o własnościach badanych narzędzi. Wynika to z faktu, że w metodach tych bada się różne parametry, często mało spójne z istotnymi parametrami opisującymi budowę narzędzi ściernych [58]. Każda z przedstawionych metod wymaga odrębnej aparatury i ma dość ograniczony obszar zastosowania. Stosowane przyrządy posiadają również niskie charakterystyki miernicze: czułość, działanie niszczące, małą dokładność, brak liniowości wskazań itp. W grupie metod zaliczonych do „dynamicznych niszczących” próbowano także odwzorowywać obciążanie ziaren ściernych podczas obróbki, czyli badać twardość jako właściwość systemu operacyjnego SO. W tym zakresie wprowadzono pojęcie „twardość dynamiczna”. Pojęcie to nie zostało jednak ściśle zdefiniowane, lecz przedstawione jedynie

opisowo. Określano ją jako „zespół własności” narzędzia ściernego w konkretnych warunkach pracy [85]. Zasadniczą przyczyną wprowadzenia takiego pojęcia oraz opracowania określonej metody badawczej [53], był fakt, że zwiększenie prędkości obwodowej ściernicy objawiało się korzystnymi wartościami wielu wskaźników szlifowania [32].

Tego typu „pozorne utwardzenie ściernicy”, obserwuje się podczas obróbki szlifowaniem [83]. Podnoszenie prędkości obwodowej v_s neutralizuje w pewnym stopniu zły dobór ściernicy do danych warunków, ale nie określa jej potencjalnych (wyjściowych) stanów jakości.

Wiązanie twardości narzędzia ściernego z jego zachowaniem się podczas eksploatacji, uwidocznilo się też propozycją definiowania twardości jako „zdolności narzędzia ściernego do przeciwstawiania się zużyciu wytrzymałościowemu w procesie obróbki” [54]. Tak sformułowane pojęcie definiuje w sposób jednoznaczny samą własność, nie przesądzając przy tym o wyborze kryterium oceny. Wytrzymałościowe zużycie ziaren ściernych polega na wykruszaniu cząstek materiału ściernego z warstw wierzchnich ziaren, a także całkowitym ich pękaniu i wypadaniu z powierzchni roboczej. Przebieg tego procesu zależy jednak nie tylko od budowy ściernicy, ale od wielu różnych czynników [8]. Stosowanie tak sformułowanej definicji może więc prowadzić do nieporozumień i błędnych działań podczas sterowania procesem. Na tej definicji jednak w istocie rzeczy opiera się jedna z najszerzej rozpowszechnionych metod pomiaru twardości narzędzi ściernych – metoda piaskowa Mackensena. Została ona także objęta standardem Polskich Norm (PN-75/M-59119). Norma ta precyzuje, iż miarą twardości jest głębokość wgłębienia h (mm), utworzonego na powierzchni narzędzia pod działaniem strumienia piasku. Ustala także zakresy pomiarowe (h_{min} i h_{max}) dla poszczególnych stopni twardości według skali Nortona, w pięciu zakresach numerów ziarna ściernego. W metodzie tej głębokość wyerodowanego otworu zależy od wytrzymałości doraźnej ziaren i mostków spoiwa położonych na powierzchniach bocznych narzędzia.

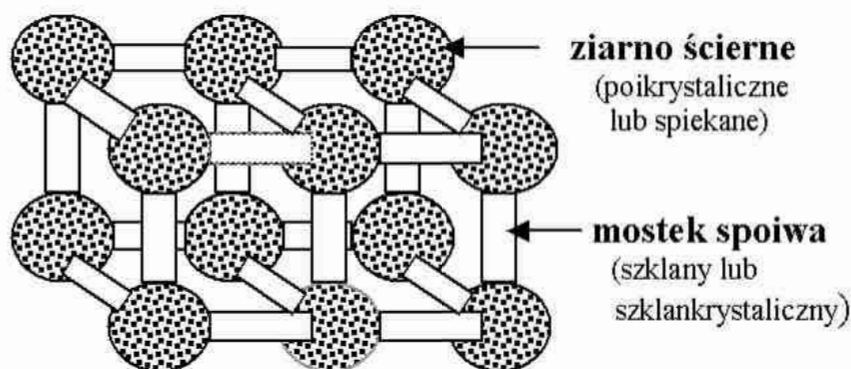
Przy formowaniu narzędzia ściernego, a zwłaszcza jego prasowaniu, ziarna ściernie leżące na powierzchniach stykających się ze stemplem, ulegają zbliżeniu do siebie i tworzą przestrzenne układy strukturalne o innym udziale poszczególnych faz niż w głębi narzędzia [8]. Tego typu badanie prowadzi więc do błędnej oceny cech budowy narzędzia i jest w wielu przypadkach przyczyną nieporozumień pomiędzy producentem a użytkownikiem. Ponadto, jest to metoda niszcząca i jako taka nie może być zalecana w nowoczesnej diagnostyce technicznej. Nowoczesna metoda badawcza winna być metodą nieniszcząca i opierać się na ściśle sprecyzowanym kryterium pomiarowym. [158]. Warunki te spełniają metody akustyczne, oparte na badaniu dynamicznego modułu Younga [134].

2.2. Moduł Younga jako kryterium oceny jakościowej ściernic

Określone tematem pracy narzędzia ścierne należą do grupy tworzyw ceramicznych. Materiały ceramiczne mają złożoną mikrostrukturę, w której występują fazy krystaliczne i amorficzne. Pod działaniem naprężenia mechanicznego następują w nich odkształcenia z zachowaniem ciągłości ośrodka, albo zmiany mikrostruktury powodujące wzrost mikropęknięć materiału [91]. Te cechy charakterystyczne dla ceramiki mają zasadnicze znaczenie dla wyznaczania ich właściwości fizyko-chemicznych i oceny przydatności do spełniania określonych funkcji [82].

Już 40 lat temu Colwell twierdził, że „jakiegokolwiek podejście do problemu twardości narzędzi ściernych wymaga uwzględnienia własności sprężystych tych narzędzi oraz sił niezbędnych do wykruszenia ziaren ściernych z powierzchni roboczej” [14]. Stwierdzenie to było inspiracją dla autora do wieloletniej pracy, dotyczącej wykorzystywania własności sprężystych do oceny jakości ściernic ze spoiwem ceramicznym.

Z punktu widzenia materiałowego, tworzywem ściernic ceramicznych o konwencjonalnej budowie są kompozyty o specyficznej budowie przestrzennej, składające się z dwóch faz materialnych: ziarna ściernego oraz mostków spoiwa o właściwościach szkła – rys. 39.



Rys. 39. Model ściernicy ceramicznej jako kompozytu

Fig. 39. Model of ceramic grinding wheel as composite

W rozważaniach teoretycznych i badaniach eksperymentalnych dotyczących tego rodzaju tworzyw ceramicznych występują trzy czynniki utrudniające jednoznaczne opisanie zachodzących zjawisk [82].

1. Nawet przy zachowaniu bardzo rygorystycznego reżimu produkcyjnego nieunikniony jest pewien rozrzut własności mechanicznych poszczególnych próbek materiałów. Konieczne jest zatem przeprowadzenie pomiarów na zbiorze przynajmniej kilkunastu próbek dla wyznaczenia wartości średniej i odchylenia standardowego.

2. Ograniczona dokładność wyznaczania wartości bezwzględnych parametrów mechanicznych (w tym modułów sprężystości) powoduje, że wielkości te mają zbliżone wartości dla ceramiek wykazujących znaczne różnice w ich przydatności.
3. Stosowane do opisu zjawisk mechanicznych modele: kontinuum sprężystego i materiału z mikropęknięciami, nie opisują grup ceramiek, lecz ich poszczególne właściwości. Określenie korelacji między wartościami parametrów mechanicznych a jej przydatnością techniczną na podstawie teoretycznych przesłanek sprawia ogromne trudności. Korelacje takie są znane z praktyki, lecz mają ograniczony zakres i brak jest publikacji na ten temat.

Z powyższych względów własności sprężyste ściernic ceramicznych mogą być opisane jedynie modelowo przy dużych uproszczeniach, dotyczących wewnętrznej budowy i wyznaczane praktycznie przez badanie stałych sprężystości [51].

Podczas eksploatacji ściernicy aktywne ziarno ściernic obciążane jest siłami skrawania. Przez mostki spoiwa obciążenie to rozprowadzane jest na całe tworzywo. W przypadku, kiedy odkształcenia następują z zachowaniem ciągłości ośrodka, dobrym przybliżeniem jest model sprężystego kontinuum. Jeżeli natomiast zmiany mikrostruktury powodują wzrost mikropęknięć materiału, prowadzący w efekcie do jego dekohezji, stosuje się model będący rozwinięciem i uściśleniem pierwotnego modelu Griffitha [91]. W rzeczywistości występuje, choć w różnym udziale, zarówno pierwszy jak, i drugi stan [120].

Ustalenie związku pomiędzy powierzchniową energią kohezji a współczynnikiem intensywności naprężeń, według modelu Griffitha, dla ceramicznych narzędzi ściernych, jest niezwykle utrudnione ze względu na przypadkowość defektów tworzących krytyczną mikroszczelinę [60]. Można to oceniać jedynie w sposób sumaryczny, np. przy użyciu metody emisji akustycznej [125]. Jeżeli badania prowadzone są dla tego samego rodzaju materiału ściernego, a szczególnie dla tego samego spoiwa, to wpływ zdefektowania mikrostruktury na właściwości mechaniczne jest quasi-stały i wówczas dobrym przybliżeniem tych właściwości jest model sprężystego kontinuum [57]. Przy tym modelu dwa czynniki mają szczególnie istotny wpływ na właściwości sprężyste ściernicy ceramicznej (jako porowatego kompozytu) podczas jej obciążania [120]:

1. siła wiązania ziaren mostkami spoiwa,
2. upakowanie ziaren (wynikające z doboru wielkości ziaren, twardości i struktury).

Pod działaniem tensora naprężeń kompozyt ten ulega odkształceniom. Sposób odkształcenia może zdradzać plastyczny lub sprężysty charakter materiału [23]. Każdy typ wiązania danego materiału ma swoją sztywność i to decyduje

o jego stałych sprężystości. Dla danego tensora naprężeń można określić stan odkształcenia materiału ceramicznego mając dwie wartości: moduł sprężystości wzdłużnej E (modułu Younga) oraz współczynnik Poissona [82]. Współczynnik Poissona ν ogólnie nie przekracza wartości 0,5, a dla narzędzi ściernych o spoiwach ceramicznych mieści się w przedziale 0,19–0,22 [22]. W odniesieniu do badanych ściernic można go więc przyjąć jako wartość ustaloną (quasi-stałą). Wobec powyższego, głównym i w istocie jedynym parametrem używanym do charakterystyki właściwości sprężystych tych narzędzi staje się moduł sprężystości wzdłużnej E (moduł Younga) [88]. Parametr ten daje określoną porcję informacji, dotyczącą stosunku zaistniałego odkształcenia pod działaniem tensora naprężeń. Powstaje z zaistnienia systemu materialnego (który jest odkształcany), a zatem jest cechą przynależną systemowi elementarnemu ZS . Jego formuła definicyjna spełnia wszystkie kryteria, stawiane dobremu opisowi danej rzeczywistości, tzn.: adekwatność, jednoznaczność, komunikatywność, logiczność, zwięzłość [31]. Ogólnie przyjmuje się, że moduł E charakteryzuje twardość materiału, a nie jest wskaźnikiem wytrzymałości [104].

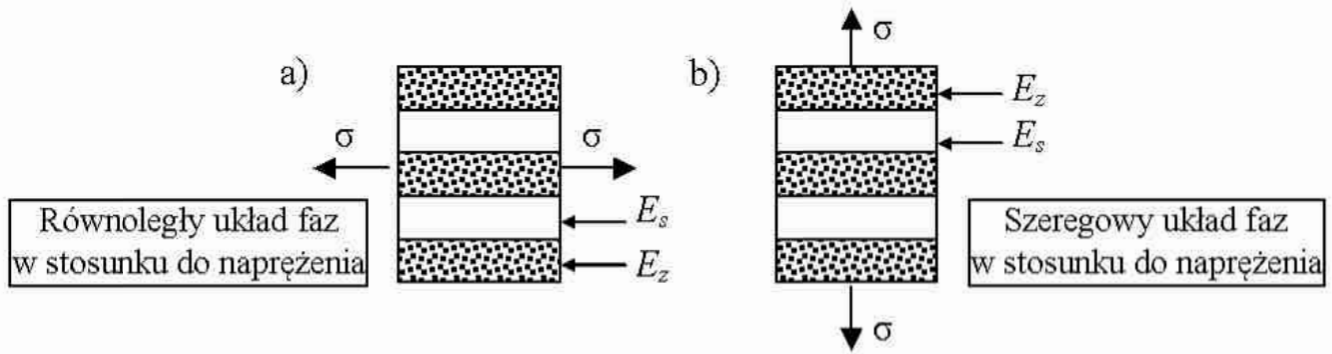
W obszarze obróbki ścierniej współcześnie coraz szerzej wykorzystuje się go się do oceny twardości narzędzi ściernych [64]. Parametr ten może być też określany podczas projektowania charakterystyki technicznej narzędzi (po opracowaniu określonej skali wartości wzorcowych) i służyć jako wartość prognostyczna [56]. Opracowanie takiej skali, dla określonej grupy rodzajowej (narzędzia ceramiczne), było jednym z istotnych problemów badawczych niniejszej pracy

Stalymi sprężystości charakteryzują się tylko odkształcalne ciała materialne, a zatem w przypadku narzędzia ściernego spojonego (rys. 38) będą to: ziarna ściernie Z (o module E_z) i mostki spoiwa S (o module E_s). W tej konwencji, wolne przestrzenie (pory) charakteryzują się brakiem sprężystości ($E_p = 0$).

Rozpatrując moduł E takiego kompozytu, w pierwszym przybliżeniu można więc pominąć wpływ fazy porów na własności sprężyste kompozytu i rozpatrywać go jako materiał dwufazowy. Model taki został zaprezentowany przez R. Pampucha [104]. W modelu tym ujęto dwa graniczne przypadki:

- a) układ równoległy – właściwy dla identycznego odkształcania się faz (ziarna i spoiwa),
- b) układ szeregowy – właściwy dla przypadku identycznego naprężenia w fazach Z i S .

Model dwufazowego kompozytu dla takich przypadków pokazano na rys. 40.



Rys. 40. Model ściernicy jako kompozytu dwufazowego
Fig. 40. Model of grinding wheel as diphase composite

W rzeczywistych ściernicach nie istnieją przypadki występowania takiej budowy o zerowej porowatości ($V_p \neq 0$), możliwe jest jednak rozważanie teoretyczne, prowadzono już bowiem rozważania fenomenologiczne, dotyczące zachowania się eksploatacyjnego narzędzi ściernych o takiej budowie [81].

Pampuch podaje, że jeżeli fazą ciągłą jest faza o większym module Younga, to zachowanie się tworzywa dwufazowego lepiej opisuje układ równoległy, zaś gdy fazę ciągłą tworzy materiał o mniejszym module, to zachowanie się tego tworzywa odpowiada układowi szeregowemu [104]. Aby przybliżyć się bardziej ku rzeczywistości można przyjąć, że wartości tego parametru dla rzeczywistych tworzyw muszą leżeć pomiędzy tymi dwoma granicznymi układami. Moduł Younga ściernicy (rozpatrywanej jako kompozyt faz materialnych ziarna Z i spoiwa S) E_{zs} może być więc wyrażony wartością średnią modułów układu szeregowego (E_{zs})_s i równoległego (E_{zs})_r:

$$E_{zs} = 0,5 \cdot [(E_{zs})_r + (E_{zs})_s] \quad (14)$$

Po podstawieniu do powyższego wzoru zależności na moduł E dla układu równoległego i szeregowego, podanych przez Pampucha [104], otrzymano:

$$E_{zs} = 0,5 \left(E_z V_z + E_s V_s + \frac{E_z E_s}{E_z V_s + E_s V_z} \right), \quad (15)$$

gdzie: V_z , V_s udziały objętościowe ziarna i spoiwa, przy czym: $V_z + V_s = 1$.

W rzeczywistej ściernicy duży procent jej objętości zdominowany jest przez pory, których udział objętościowy V_p może dochodzić do 50% objętości. Nie mając jednak właściwego sobie modułu sprężystości ($E_p = 0$), nie mogą być rozpatrywane według modelu fazowego.

Badania przeprowadzone dla ciągłego ośrodka, zawierającego wyizolowane pory, wykazały, że wraz ze wzrostem porowatości zmniejsza się moduł E , co

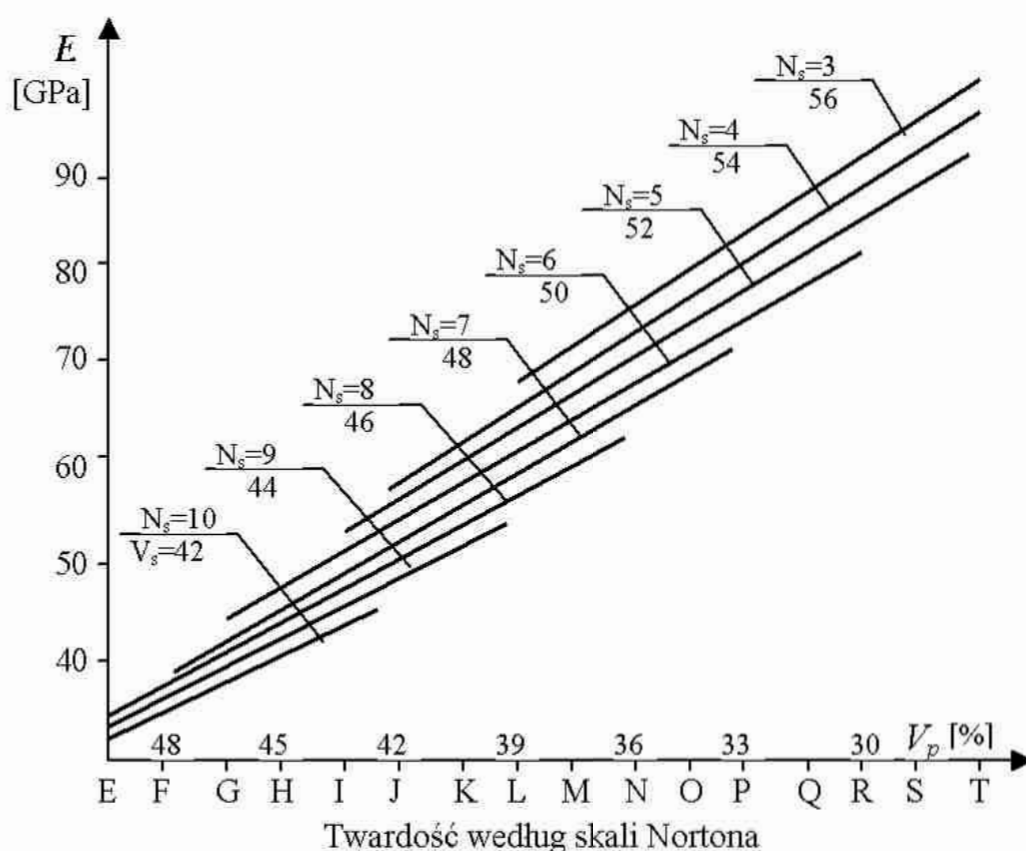
można wyrazić pewnym współczynnikiem poprawkowym $\eta = f(V_p)$ [101]. Dla ceramicznych narzędzi ściernych, zakresie standardowej porowatości ($22,5\% \leq V_p \leq 49,5\%$), funkcję $\eta = f(V_p)$ można przybliżyć zależnością liniową o ujemnym współczynniku kierunkowym w postaci [101]:

$$\eta = 1,115 - 0,0173 V_p \quad (16)$$

Zależność ta określa, w jakim stopniu objętościowy udział por wpływa na zmniejszenie modułu Younga faz materialnych E_{zs} ściernicy, wyznaczonych wzorem (15). Po połączeniu obu tych wzorów otrzymujemy ogólną zależność na obliczenie modułu E narzędzi ściernych:

$$E = E_{zs} (1,115 - 0,0173 V_p) \quad (17)$$

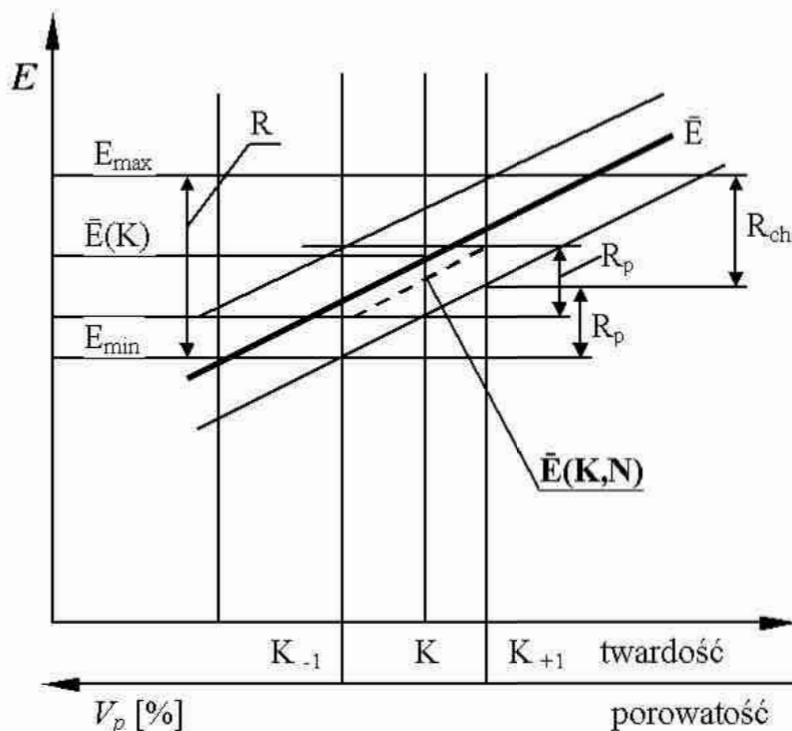
Podstawiając do tej zależności typowe wartości modułów sprężystości dla ścierniwa np. z tlenku glinu ($E_z = 350$ GPa) oraz spoiwa typu szkło ($E_s = 70$ GPa), otrzymano model powiązań modułu E z parametrami budowy ściernic ceramicznych z tlenku glinu. Graficzny obraz tych powiązań obrazuje rys. 41.



Rys. 41. Model powiązań modułu E z parametrami budowy ściernic ceramicznych
Fig. 41. Model of connections of module E with parameters of ceramic grinding wheel structure

Z przedstawionego modelu wynika, że moduł E wzrasta wraz ze wzrostem twardości oraz zmniejszaniem numeru struktury (N_s), przy czym znacznie silniej zależy od twardości niż od struktury ściernicy. Z przedstawionej analizy wynika, że moduł E , jako cecha przypisana systemowi elementarnemu ZS , jest czułym parametrem na wszelkie zmiany w budowie narzędzia ściernego (zmiana składników oraz ich udziałów objętościowych).

Przyporządkowując wartości modułu E poszczególnym klasom twardości, według skali Nortona, należy jednak uwzględnić i oszacować wpływ wielu czynników oraz różnorodnych zakłóceń procesu. Jest to (poza błędem pomiarowym) wpływ struktury, ziarnistości, własności ścierniwa i spoiwa oraz wpływ zakłóceń wynikających z działania czynników losowych w procesie wytwarzania (szczególnie podczas wypalania). Systemowo wpływ ten może być przedstawiony za pomocą modelu przedstawionego na rys. 42 [51].



Rys. 42. Oddziaływanie czynników systemowych na moduł E narzędzi ściernych

Fig. 42. Influence of system factors on module E of abrasive tools

Z powyższego modelu wynika, że całkowity rozstęp modułu E dla różnorodnych narzędzi ściernych o tym samym symbolu twardości ($E, FG\dots$) jest sumą rozstępu wartości E , wynikających z zakłóceń produkcyjnych R_p oraz rozstępu R_{ch} , wynikającego z różnorodnych cech budowy (struktury, ziarnistości, własności surowców itp.). Należy zatem przyjąć, że:

$$E_{\max} - E_{\min} \leq R_p + R_{ch} = R \quad (18)$$

Dla określonego narzędzia (linia przerywana na rys. 42) producent może wyznaczyć dokładną wartość średnią $\bar{E}(K, N)$ oraz rozstęp R_p , jako miarę rozproszenia wyników w danej (K) klasie twardości. Przyjmując, że dla określonego narzędzia różnica pomiędzy największą i najmniejszą wartością E dla danej klasy twardości nie przekracza R_p , zapewnia się wysoką jakość wytwarzania i stabilność własności mechanicznych w partii wyrobów o danej charakterystyce. Jest wtedy spełniony warunek:

$$\bar{E}(K, N) - 0,5R_p < E < \bar{E}(K, N) + 0,5R_p \quad (19)$$

Użytkownik narzędzia mógłby w takim przypadku oceniać jego twardość przez wyznaczenie modułu E , gdyby producent podawał dla każdego z produkowanych seryjnie narzędzi wartość średnią E dla danej partii wyrobów. Postulat ten nie jest jeszcze obecnie realizowany w praktyce, chociaż istnieją wszelkie przesłanki (metodologiczne i techniczne) do takiego działania. [55].

Zakładając natomiast, że różnica między największą i najmniejszą wartością E dla danej klasy jest równa $R = R_p + R_{ch}$, czyli:

$$\bar{E}(K, N) - 0,5R_p \leq E \leq \bar{E}(K, N) + 0,5R_p \quad (20)$$

otrzymuje się bardzo szeroki przedział dopuszczalnych zmian. Powodowałoby to znaczne pokrywanie się części zakresów E przypisanych różnym klasom twardości. Tak więc aby tego uniknąć, rozstęp R odpowiada tylko wartości R_p (wynikającej z zakłóceń produkcyjnych), co w konsekwencji powoduje np. przesuwanie się poziomów E dla narzędzi o różnej charakterystyce. Użytkownik, po dobraniu odpowiedniej charakterystyki narzędzia, ma tym samym ustalony poziom wartości średniej modułu \bar{E} . Interesuje go wobec tego zakres zmian tego parametru, wynikający z zakłóceń produkcyjnych R_p . Rozstęp ten jest podstawową cechą określającą system wytwarzania u danego producenta i jest miernikiem jakości wykonania partii narzędzi ściernych o jednakowej charakterystyce.

Twierdzenia naukowego nie można wykorzystać do budowania teorii, dopóki nie zostanie jednak znaleziona ocena ilościowa [108]. Ocenę taką, w odniesieniu do modułu Younga ściernic ceramicznych o konwencjonalnej budowie, dają badania akustyczne tych narzędzi [57].

2.3. Podstawy diagnostyki ściernic metodami akustycznymi

Badanie diagnostyczne w ogólności składa się z odebrania sygnału emitowanego przez obiekt, wydzielenia w nim cech charakterystycznych i porównania ich z cechami sygnałów, odpowiadających możliwym stanom obiektu rozróżnianym podczas badania. Wynikiem badania diagnostycznego jest stwierdzenie przynależności stanu obiektu do jednej z góry ustalonych klas tych stanów [158].

Specyfiką diagnostyki technicznej spojonego narzędzia ściernego (ściernicy) jest to, że nie można dokonywać bezpośrednich pomiarów składników tworzących strukturę tego narzędzia – zarówno jeśli chodzi o rodzaj zastosowanych materiałów jak i ich udziały objętościowe. Drogą do uzyskania informacji o strukturze wewnętrznej wytworzonego narzędzia jest pomiar pośredni. Podstawową sprawą do rozwiązania przy tego typu badaniach jest znalezienie szybkiej i powtarzalnej metody pomiaru, dającej sygnał diagnostyczny dobrze skorelowany z parametrami tej struktury [57]. Takiej charakterystyki pomiarowej można oczekiwać od metod wibroakustycznych, opartych na badaniach tzw. efektów resztkowych (drżania, hałas itp.). W nowoczesnym przemyśle budowy maszyn metody drganiowe zajmują bardzo poczesne miejsce [12]. Rozchodzenie się drgań oparte jest na prawach akustyki. Dźwięk bowiem to fala akustyczna rozchodząca się w ośrodku sprężystym [26].

Punktem wyjścia do powstania fali akustycznej jest stan naprężeniowy elementów konstrukcyjnych. Każdemu stanowi technicznemu pobudzonego (naprężonego) narzędzia ściernego odpowiada określony sygnał akustyczny (drżaniowy), który odbierany jest przez czujnik toru pomiarowego – rys. 43.



Rys. 43. Schemat ogólny badania akustycznego narzędzi ściernych

Fig. 43. General diagram of acoustic examinations of abrasive tools

Rozpoznanie tego stanu, czyli postawienie diagnozy, polega więc na rozpoznaniu sygnału akustycznego wysyłanego przez badane narzędzie i porównaniu go ze stanem wzorcowym, ujętym odpowiednią skalą stanów [119].

Prawidłowość postawionej diagnozy zależy od dwóch operacji [108]:

- dokładności i poprawności przyjętej metody badań,
- poprawności wnioskowania logicznego, zależnego od diagnostyki.

Dlatego doskonalenie badań diagnostycznych prowadzone jest zarówno przez zwiększenie dokładności samych przyrządów pomiarowych, jak i zmianę mechanizmu wnioskowania logicznego. W tym zakresie praktyczna realizacja polega głównie na zastąpieniu człowieka elektroniczną techniką obliczeniową.

Ze względu na szereg swych zalet, metody diagnostyki akustycznej podlegają współcześnie intensywnemu rozwojowi. Przede wszystkim (co jest istotne dla przyjętego podejścia systemowego) pozwalają na otrzymanie istotnych danych o stanie zbiorczym powiązanych ze sobą elementów obiektu. Ponadto, sygnał akustyczny wyróżnia się ogromną pojemnością informacyjną i nie potrzeba do jego odebrania dużej liczby czujników pomiarowych [159].

Funkeję pomiarowo-analizującą mogą spełniać przyrządy o różnej zasadzie działania i różnej konstrukcji (analogowe, cyfrowe, hybrydowe), przy czym dynamika rynku tych przyrządów jest tak duża, że nie jest celowe opisywanie poszczególnych typów i zasad ich działania. Podaje się też, że znacznie ważniejsze od takiego opisu jest przedstawianie sposobu organizacji badania diagnostycznego w układzie: źródło – droga przetwarzania – odbiornik [158].

W działaniach technicznych istnieją dwa podstawowe podejścia metodyczne do badania różnych zjawisk akustycznych: czasowe i spektralne [151]. W pierwszym przypadku istotna jest ocena przebiegu zjawisk w czasie i podstawą do tej oceny jest analiza procesu w postaci sygnału sinusoidalnego otrzymanego z toru pomiarowego. W podejściu spektralnym proces rozpatrywany jest jako zbiór drgań sinusoidalnych. Zbiór ten tworzy widmo procesu, czyli jego spektrum. W widmie każda składowa sinusoidalna może być przedstawiona w postaci linii pionowej. Położenie tej linii spektralnej wskazuje na częstotliwość drgań sinusoidy, a jej wysokość amplitudę. Analizując widmo można zobaczyć, jakie sinusoidy wchodzi w jego skład i jaka jest ich intensywność. Przy rozpatrywaniu procesów spektralnie jeden różni się od drugiego częstotliwością tworzących go sinusoid i ich intensywnością [26]. W badaniach akustycznych narzędzi ściernych wykorzystuje się więc to zjawisko, przyjmując, że tylko narzędzia o identycznej budowie wewnętrznej będą posiadały takie same widmo częstotliwości drgań własnych [110].

Nośnikiem informacji od jej źródła do odbiorcy jest sygnał. Sygnałem może być dowolne zjawisko fizyczne przemieszczające się w przestrzeni, a zatem oddziałujące na odległość. Takim zjawiskiem w diagnostyce kontrolnej narzędzi ściernych jest powstawanie i rozchodzenie się w nich dźwięku. W środowisku, w którym rozchodzi się dźwięk, przebiega proces falowy. Polega on na tym, że pojawiające się w niektórych ograniczonych miejscach deformacje (i związane z nimi naprężenia wewnętrzne w materiale) przekazywane są innym częściom ciała [151]. Każde falowanie związane jest więc z drganiem. Aby w danym

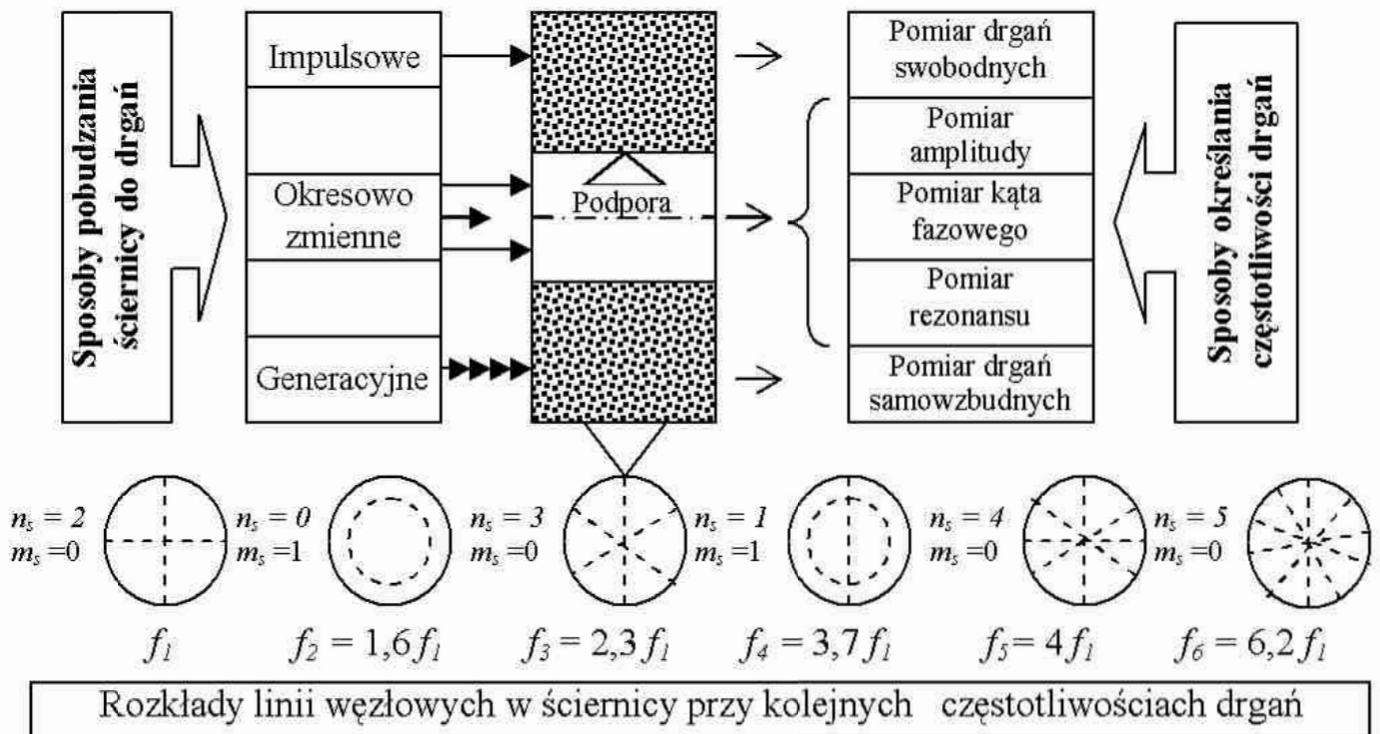
środowisku powstał proces falowy, trzeba więc wyprowadzić ze stanu spoczynku jeden lub kilka punktów tego środowiska, czyli wzburzyć je. Fale przenoszone przez cząsteczki materialne obiektu do czujnika drgań, stanowią sygnały niosące informację o stanie sprężystości wnętrza tego obiektu. Czujnik ten przetwarza docierające do niego drgania mechaniczne na drgania elektryczne. W ściernicy pobudzonej do drgań odbywa się złożona interferencja fal sprężystych od poszczególnych ziaren, dlatego też nie można przeanalizować i obliczyć teoretycznie intensywności procesów falowych [120].

Możliwość praktycznego rozwiązania zadania wiąże się z wykorzystaniem prawideł informacji. W tym wypadku zamiast badania złożonego procesu rozprzestrzeniania się fal sprężystych w obiekcie, rozpatruje się proces przekazywania sygnału od obiektu do czujnika. Fizyczna strona tego zjawiska staje się drugorzędna, a zastępuje ją czysto formalny problem przekształcenia sygnału w czasie przekazywania go przez kanał [108]. Przy takim założeniu udaje się stosunkowo prosto określić charakterystykę widma sygnału akustycznego.

Podstawowym twierdzeniem w teorii widm sygnałów akustycznych jest twierdzenie o liniowości kanału akustycznego. Mówiąc inaczej: zakłada się, że w czasie rozchodzenia się fal sprężystych, wzbudzonych mechanicznie, materiał, z którego wykonano dany obiekt, podlega prawu Hooke'a, a jego naprężenie są proporcjonalne do powstających deformacji [26]. Na podstawie teorii sprężystości można więc dla każdego ciała o określonym kształcie (a więc i dla przyjętych do analizy ściernic ceramicznych) określić moduł sprężystości wzdłużnej E , jeśli zna się częstotliwości drgań własnych tego ciała.

Ściernicę tarczową z fizycznego punktu widzenia można traktować jako cienką okrągłą płytę. Płyta taka pobudzona do drgań wykazuje szereg częstotliwości własnych, które składają się na spektrum (widmo) częstotliwości [151]. Częstotliwości te odpowiadają różnym rozkładom linii węzłowych w postaci średnic (o liczności n_s) lub okręgów (o liczności m_s). Najniższa częstotliwość drgań własnych nazywana jest częstotliwością podstawową f_1 (w płycie drgającej z częstotliwością podstawową, linie węzłowe tworzą dwie średnice przecinające się pod kątem prostym). Drugiej częstotliwości drgań własnych f_2 odpowiada linia węzłowa w kształcie okręgu. Wyższym częstotliwościom odpowiadają linie węzłowe w kształcie wielokrotnych średnic lub koncentrycznych okręgów.

Wyróżnia się pięć podstawowych metod określania częstotliwości drgań własnych ściernic oraz trzy sposoby pobudzania ich do drgań [87]. Sposoby te, w ujęciu systemowym, pokazano na rys. 44.



Rys. 44. Sposoby badań akustycznych ściernic w ujęciu systemowym

Fig. 44. Methods of acoustic examinations of abrasive tools in system approach

Jeżeli ustawi się podporę w określonym węźle, można uzyskać wzmocnienie danej postaci drgań i osłabić pozostałe częstotliwości występujące w spektrum; zasadę tę wykorzystuje się w metodyce badania częstotliwości drgań własnych ściernic płaskich [119]. Największa amplituda drgań występuje na przekątnych pomiędzy węzłami średnicowymi. W pobliżu tych miejsc najkorzystniej jest więc pobudzać ściernicę do drgań wzbudnikiem oraz odbierać drgania czujnikiem [120].

W diagnostyce akustycznej do odbierania sygnałów płynących z badanego obiektu stosuje się zawsze czujniki przyspieszeń. Posługiwanie się tego rodzaju czujnikami pozwala odebrać drgania pochodzące od fali sprężystej i jednocześnie nie odbierać drgań wywołanych niewyrównoważeniem elementów [108]. Szczególnie nadają się do tego celu czujniki działające na zasadzie zjawiska piezoelektrycznego. Różnicę potencjałów powstającą między oboma stronami płytki kryształu można wzmocnić do wymaganej wielkości i wykorzystać jako sygnał akustyczny [159].

Impulsowy sposób wzbudzania drgań stosuje się przy określaniu częstotliwości drgań własnych metodą drgań swobodnych. Wzbudzanie to realizuje się zwykle sposobem mechanicznym, najczęściej przez uderzenie badanej ściernicy odpowiednim bijakiem. Ten sposób wzbudzania stosowany jest w urządzeniu GrindoSonic [143] oraz Zwuk 202 [29].

Wzbudzanie siłą okresowo zmienną stosuje się przy określaniu częstotliwości metodą drgań wymuszonych (pomiar amplitudy, kąta fazowego lub rezonan-

su). Wzbudzanie drgań siłą okresowo zmienną odbywa się w układzie składającym się z generatora napięcia sinusoidalnie zmiennego, zasilającego (przez wzmacniacz) odpowiedni wzbudnik drgań. Dostrajając częstotliwość drgań generatora można, z określonych parametrów fali akustycznej, określić częstotliwość drgań własnych badanego narzędzia. Jest to najbardziej rozpowszechniony sposób stosowany w diagnostyce kontrolnej ściernic metodami akustycznymi [119].

Generacyjny sposób wzbudzania drgań stosuje się przy określaniu częstotliwości drgań własnych metodą drgań samowzbudnych. Został on, przykładowo, zastosowany w twardościomierzu typu MTS-1, opracowanym przez pracowników Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN [86].

Ogólnie rzecz biorąc, częstotliwość podstawowych drgań własnych f_1 ściernicy płaskiej może być przedstawiona jako iloczyn trzech funkcji [120]:

– F_1 , zależnej od rodzaju i postaci drgań

$$F_1 = \left[\frac{\pi}{\psi} \sqrt{3(1 - \nu^2)} \right]^{-1} \quad (21)$$

– F_2 , zależnej od kształtu i wymiarów ściernicy

$$F_2 = \left[1 - \left(\frac{H}{D} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{D^2}{T} \right)^{-1} \quad (22)$$

– F_3 , zależnej od stałych materiałowych ściernicy

$$F_3 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (23)$$

W przypadku ściernic ceramicznych, drgających z częstotliwością podstawową f_1 , współczynnik ψ przyjmuje wartość 5,251 [120]. Jeżeli przyjąć ponadto, że współczynnik Poissona dla narzędzi ściernych, zmienia się w niewielkim zakresie ($\nu = 0,19-0,22$) [22] i może być ustalony np. jako wartość średnia $\nu = 0,205$, to wówczas funkcja F_1 przyjmuje wartość zbliżoną do jedności ($F_1 \sim 1$). Wobec powyższego, wprowadzając w miejsce funkcji F_2 współczynnik kształtu k opisany zależnością:

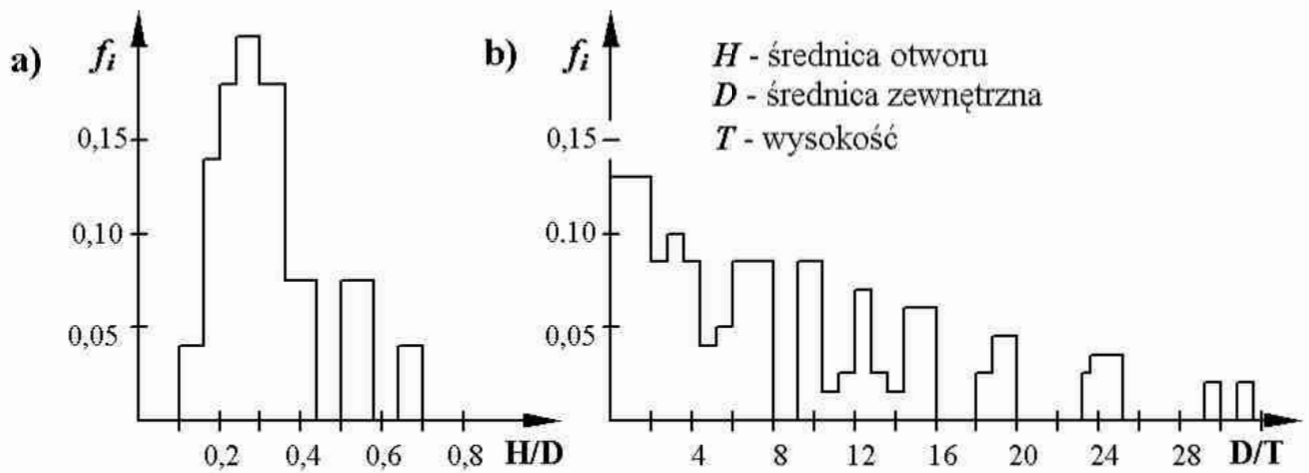
$$k = \left[1 - \left(\frac{H}{D} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{D^2}{T} \right)^{-1} \quad (24)$$

można określić moduł sprężystości wzdłużnej E tych narzędzi, przekształcając wzór (23) do postaci:

$$E = \left(\frac{f_1}{k} \right)^2 \cdot \rho \quad (25)$$

Przy posługiwaniu się tą zależnością należy tylko spełnić warunek, który dotyczy tego, aby podczas pomiaru częstotliwości drgań własnych f_1 ustalić ściernice w jej węzłach średnicowych (stawiając pionowo, zawieszając na odpowiednim wieszaku, lub kładąc na krzyżowej podporze) [120].

Współczynnik kształtu (k) zależy gabarytów ściernicy: stosunku średnic: otworu H do zewnętrznej D , oraz średnicy zewnętrznej D do wysokości H . Rozkład częstości występowania stosunku (H/D) dla płaskich ściernic ceramicznych, standardowej produkcji, pokazano na rys.45a, natomiast rysunek 45b obrazuje częstość występowania stosunku (D/H) tych narzędzi [58].



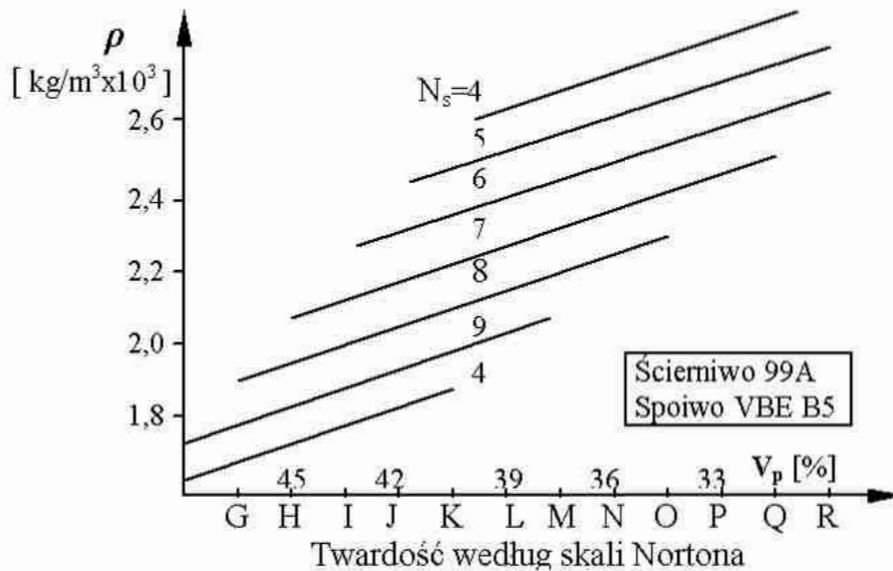
Rys. 45. Stosunki wymiarów gabarytowych ściernic standardowej produkcji
Fig. 45. Ratios of overall dimensions of commercial grinding wheels

Dane zobrazowane na tym rysunku pokazują, że stosunki gabarytowe ściernic mogą się zmieniać w stosunkowo dużym zakresie. Świadczy to o tym, że koncepcja przyjmowania współczynnika kształtu k jako wartości stałej nie jest zasadna. Wnosiłaby bowiem duży błąd pomiaru. Musi być zatem wyznaczana indywidualnie dla każdego badanego narzędzia.

Gęstość ρ ściernicy, czyli masa jednostki objętości V , jest istotną cechą fizyczną narzędzi ściernych z regulowaną strukturą. Umożliwia bowiem stwierdzenie zgodności otrzymanej struktury narzędzia ze strukturą projektowaną [121]. Gęstość ρ gotowego wyrobu równa jest sumie udziałów objętościowych: ziarna V_z i spoiwa V_s oraz ich gęstości ρ_z i ρ_s . Wolne przestrzenie pomiędzy ziarnami i spoiwem zawierają powietrze, które zostaje usunięte w procesie wypalania. Udział por V_p nie wpływa tym samym na masę tej jednostki [45]. Zatem gęstość ρ ściernicy może być obliczona z zależności:

$$\rho = \frac{V_z \cdot \rho_z + V_s \cdot \rho_s}{100} \quad (26)$$

Wychodząc z tej zależności, obliczono gęstości ściernic ceramicznych z elektrokorundu 99A i spoiwa VBE B5 (przyjmując wartości: $\rho_z = 3,9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ i $\rho_s = 2,4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$). Graficzny obraz tych obliczeń przedstawiono na rys. 46.



Rys. 46. Wpływ budowy ściernic ceramicznych na ich gęstość

Fig. 46. Influence of ceramic grinding wheel structure on their density

Korzystając z powyższych danych (dotyczących współczynnika kształtu k oraz gęstości ρ) można wyznaczyć moduł E , jeżeli zmierzona zostanie częstotliwość drgań własnych f_1 ściernicy. Biorąc po uwagę typy i gabaryty ściernic ceramicznych, istnieje konieczność opracowania trzech różnych metod pomiaru modułu E tych narzędzi. Opracowane metody zestawiono na rys. 47.



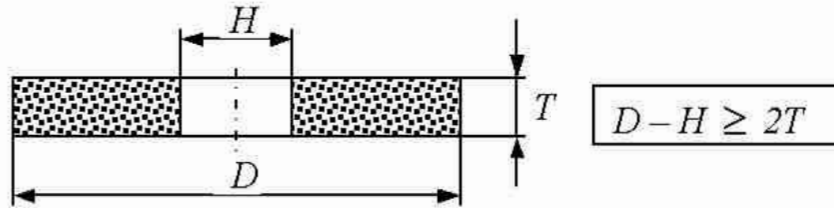
Rys. 47. Podział opracowanych metod pomiarowych modułu E

Fig. 47. Classification of developed measuring methods for module E

Wyróżniono je ze względu na zakres częstotliwości aparatury pomiarowej, niezbędny do badań danego typu ściernic. Sposób pomiaru ściernic określonego typu tymi metodami jest treścią kolejnych podrozdziałów pracy.

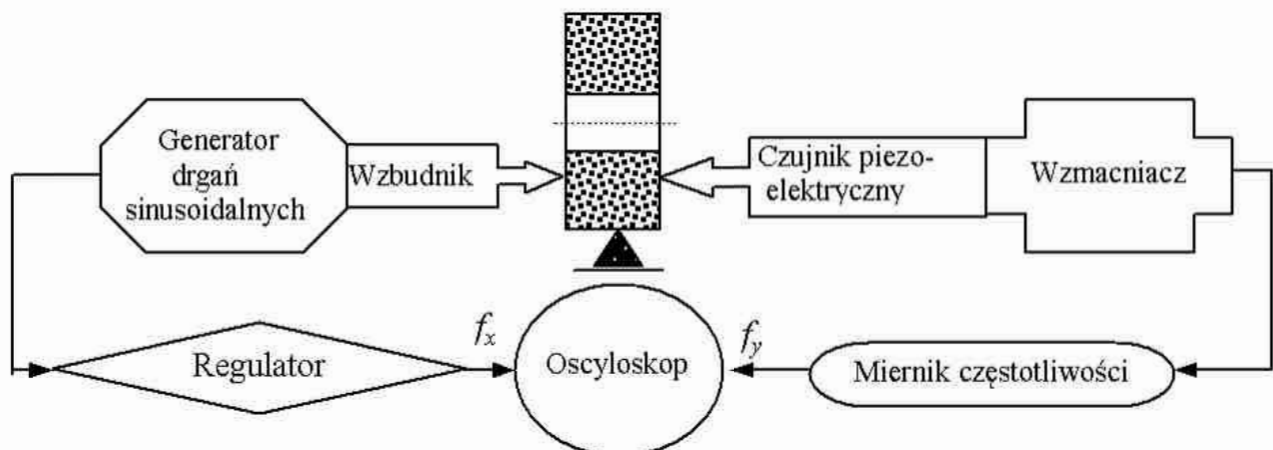
2.4. Metodyka diagnostyki kontrolnej ściernic płaskich

Przedstawiony wcześniej sposób wyznaczania modułu E na podstawie pomiaru częstotliwości drgań własnych f_i opiera się na założeniu, że badane narzędzie jest cienką tarczą z centralnie położonym otworem. Przyjęto więc ograniczenie, że pod tym pojęciem rozumieć się będzie dalej ściernicę płaską o zarysie 1-C (wg PN-91/M-59101), której różnica średnicy zewnętrznej D oraz otworu H jest większa od podwojonej wysokości T – rys. 48.



Rys. 48. Szkic ściernicy płaskiej traktowanej jako cienka tarcza
Fig. 48. Sketch of flat grinding wheel treated as a thin disk

Zbadano, że przy takim warunku możliwym jest powstanie w ściernicy sprężystej fali stojącej [120]. Jeżeli pobudzić ją do drgań, np. przez uderzenie jakimś przedmiotem, to pozyskana energia rozpraszana będzie w oscylacjach. Oscylacje te są złożone i zależą od charakteru i siły uderzenia oraz cech materiałowych drgającego ciała. Swobodnie oscylujące ciało dąży do szybkiego osiągnięcia swych drgań własnych, niezależnie od tego, jak złożone były drgania początkowe. Jeżeli do badanego ciała doprowadzi się harmoniczne obciążenie zewnętrzne, zmienne w czasie z częstotliwością f_x , które będzie równe jednej z częstotliwości drgań własnych tego ciała f_y , to wystąpi w nim rezonans [26]. Zasadę tę wykorzystano do opracowania rezonansowej metody pomiaru częstotliwości drgań własnych ściernic ceramicznych – rys. 49 [120].

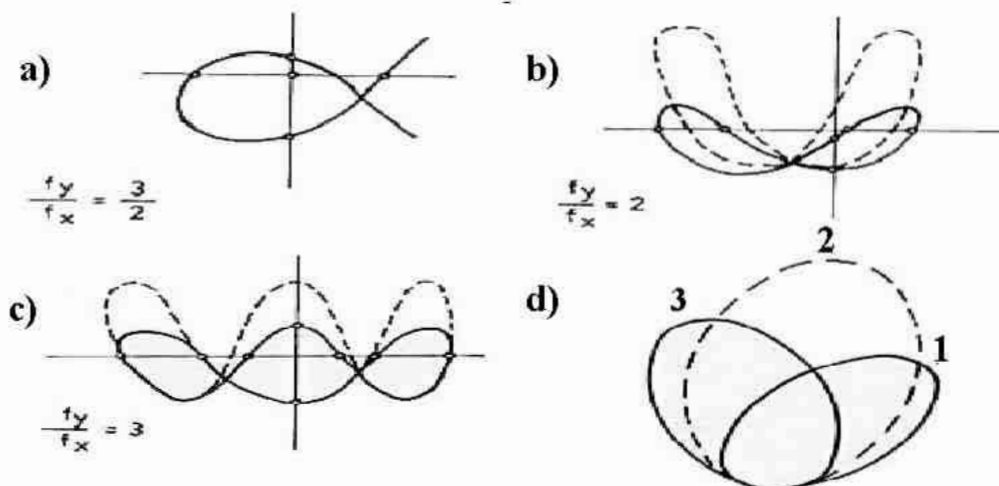


Rys. 49. Schemat funkcjonalny metody rezonansowej
Fig. 49. Functional diagram of resonance method

Zmienne napięcie z generatora podawane jest do wzbudnika, będącego przetwornikiem drgań elektrycznych. Wytworzone drgania korpusu cewki wzbudnika przenoszone są na ściernicę, wywołując w niej falę akustyczną. W przypadku wzbudzania ściernicy swobodnej na brzegach, lub z utwierdzonym środkiem, następuje interferencja fal i powstaje w niej fala stojąca. Jeżeli wysokość ściernicy T jest znacznie mniejsza od długości fali, zachodzi zjawisko wielokrotnego odbicia fali akustycznej i dla określonych częstotliwości można otrzymać znaczne wzmocnienie amplitudy drgań. Aby otrzymać drgania podstawowe f_1 , ściernica winna być ustalona w swych węzłach średnicowych. Można to uzyskać przez [55]:

- położenie ściernicy na krzyżowych podporach,
- postawienie pionowo na stole lub podłodze,
- zawieszenie na otworze centralnym,
- nałożenie otworem na stożek pomiarowy o czterech żebrach.

Drgania ze ściernicy przejmowane są przez czujnik piezoelektryczny, w którym napięcie jest proporcjonalne do przyłożonej siły. Napięcie to, po wzmocnieniu, przenoszone jest do miernika częstotliwości i oscyloskopu. Na ekranie oscyloskopu uwidaczniają się figury Lissajous – rys. 50.



Rys. 50. Schemat figur Lissajous powstających w wyniku rezonansu

Fig. 50. Diagram of Lissajous figures formed as a result of resonance

Analiza kształtu tych figur umożliwia porównywanie częstotliwości drgań generatora i ściernicy. Stosunek tych częstotliwości: f_y/f_x , wyrażający się stosunkiem liczb całkowitych, można ustalić na podstawie następującego rozumowania. Badany przebieg sinusoidalny o częstotliwości f_x podawany na płytce poziome oscyloskopu, przemieszcza wiązkę elektronów o tyle razy w lewo i prawo, ile okresów zmiany napięcia działającego na płytce, potrzeba do jednorazowego obrysowania

figury Lissajou. Podobnie, przebieg sinusoidalny o częstotliwości f_y , działający na płytki pionowe, przemieszcza wiązkę elektronów tyle razy w górę i dół, ile okresów zmiany napięcia, działającego na te płytki, potrzeba do jednorazowego obrysowania figury Lissajou. Liczbę przemieszczeń wiązki w prawo lub lewo można obliczyć na podstawie liczby przecięć prostej równoległej do osi y z daną figurą Lissajou, natomiast liczbę przemieszczeń wiązki w górę lub w dół można ustalić na podstawie liczby przecięć prostej równoległej do osi x . Obie proste należy prowadzić tak, aby nie przechodziły one przez punkty węzłowe figury (rys. 50a). W przypadku wzbudzenia ściernicy podharmonicznymi: 2 i 3, otrzymuje się obraz taki, jak na rys. 50b,c. Dla tych podharmonicznych, ściernica wzbudzana jest odpowiednio dwu i trzykrotnie niższą częstotliwością z generatora.

W chwili, gdy dostroimy generator tak, aby stosunek częstotliwości: $f_y/f_x = 2:1$ lub $f_y/f_x = 3:1$, powstaje rezonans. Zjawisko rezonansu objawia się gwałtownym wzrostem amplitudy drgań ściernicy, co na ekranie oscyloskopu uwidacznia się dużym wzrostem rzędnych figur Lissajou. Obrazują to linie przerywane na rys. 50b,c,d.

Gdy częstotliwości generatora i ściernicy są równe $f_y/f_x = 1:1$, otrzymuje się obraz taki, jak na rys.50d. Cyframi: 1, 2, 3 oznaczona kolejne położenia figury Lissajou przy wzrastającej częstotliwości generatora. Wielkość elipsy lub koła (przy dokładniejszym wyskalowaniu oscyloskopu) określa siłę rezonansu.

Możliwość badania niższych podharmonicznych pozwala na weryfikację otrzymanego wyniku, co jest istotne przy badaniu ciał o dużym współczynniku tłumienia, jakimi są ceramiczne narzędzia ściernic. Widok przyrządu do diagnostyki kontrolnej ściernic płaskich (tarcze) pokazano na rys. 51 [120].



Rys. 51. Widok ogólny przyrządu do diagnostyki kontrolnej ściernic płaskich
Fig. 51. General view of device for control diagnosis of flat grinding wheels

Przyrząd ten pozwala rozwiązać postawione zadanie badawcze, dotyczące diagnostyki kontrolnej jakości wykonania ściernic ceramicznych (określonej klasy) według przyjętego wskaźnika liczbowego. Z systemowego punktu widzenia problem badawczy jest więc „zadaniem wejścia”, tzn.: zadane są określone parametry opisujące obiekt, należy określić realizację konstrukcyjną tych parametrów i wyznaczyć parametr systemowy tej realizacji [77].

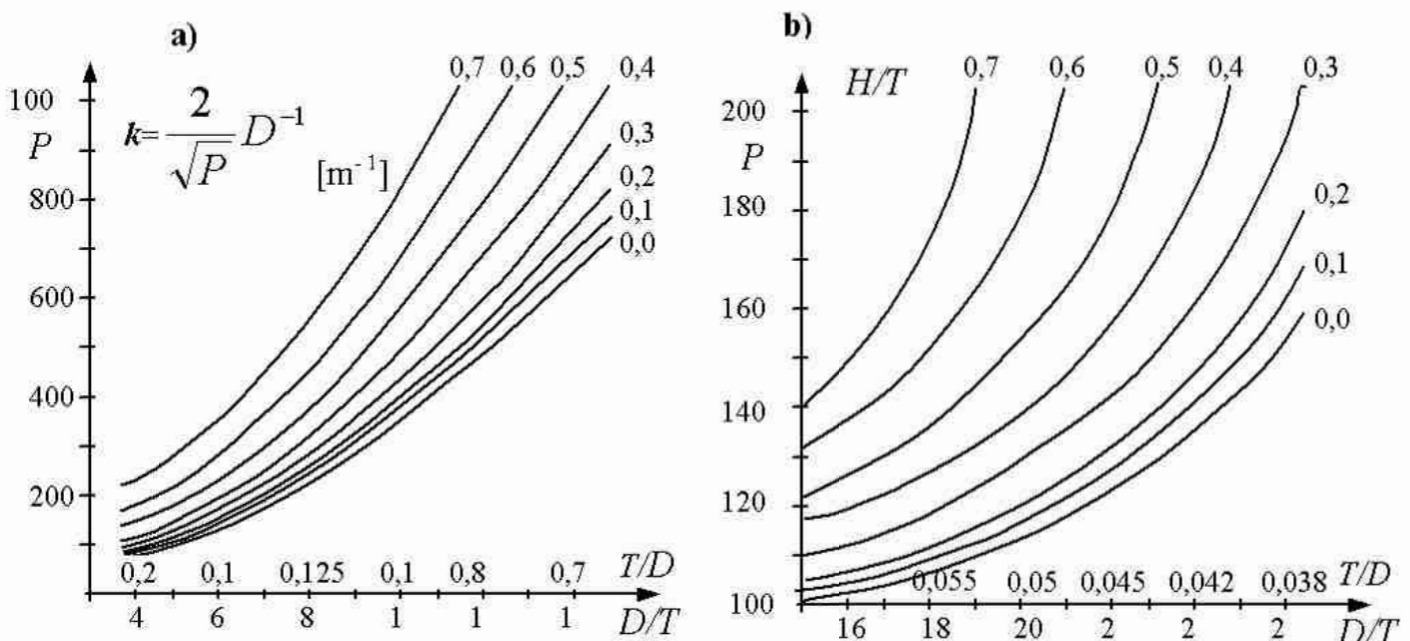
Moduł E jest parametrem systemowym (przypisanym systemowi narzędziowemu \underline{SN}), a jego wartość wynika z zaprojektowanej charakterystyki technicznej narzędzia ściernego. Opracowana metoda badań pozwala na określenie rzeczywistej wartości tego parametru, czyli spełnia warunek „realizacji konstrukcyjnej danego obiektu”. Można więc powiedzieć, że dla przyjętych do analizy ściernic ceramicznych z klasy „tarcz”, systemowy problem badawczy typu „zadanie wejścia” został rozwiązany.

Rozwiązanie to opiera się prawie metodologicznym w następującej postaci:

„Dla każdej ściernicy o jednakowych wymiarach jeśli występuje zgodność częstotliwości podstawowych drgań własnych, występuje także zgodność prędkości rozchodzenia się dźwięku C_l , świadcząca o zgodności stałych materiałowych E oraz ρ ”. Prawo to można ująć wzorem:

$$C_l = \frac{f_1}{k} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (27)$$

Wartość współczynnika k dla różnych ściernic można wyznaczyć z wykresów na rys. 52a (małe rozmiary) i 52b (duże rozmiary tarczy) [119].



Rys. 52. Wykresy do wyznaczenia współczynnika kształtu ściernic tarczowych
Fig. 52. Diagram to determine the shape factor of disk-type grinding wheels

Chcąc więc wyznaczyć moduł E badanej ściernicy należy pomierzyć jej wymiary: D , T , H oraz zważyć, aby określić masę m . Następnie zbadać częstotliwość podstawowych drgań własnych f_1 oraz obliczyć wartość współczynnika kształtu k , korzystając z wykresów przedstawionych na rys. 51. Poszukiwaną wartość modułu E oblicza się z wzoru:

$$E = \left(\frac{f_1}{k} \right)^2 \cdot \frac{4m}{\pi T (D^2 - H^2)} \quad , \quad [\text{GPa}] \quad (28)$$

przy czym: masa ściernicy m [g], częstotliwość f_1 [Hz], wymiary D , T , H [cm].

Wzór ten pozwala wyznaczyć moduł E ściernic płaskich typu 1C, których stosunek średnicy otworu H do średnicy zewnętrznej D mieści się w zakresie:

$$0,0 < \frac{H}{D} \leq 0,7 \quad , \quad (29)$$

a stosunek średnicy zewnętrznej D do wysokości T objęty jest warunkiem

$$3,0 < \frac{D}{T} \leq 25 \quad . \quad (30)$$

Zbadano, że częstotliwość drgań podstawowych f_1 ściernic ceramicznych o standardowych wymiarach i charakterystyce według PN71-59101 (tab.I) zawiera się w zakresie 500–3000 Hz, dlatego też opracowaną metodę pomiaru nazwano „*metodą niskiej częstotliwości*”.

Z testowania przyrządu w warunkach przemysłowych i laboratoryjnych wynikało, że w ściernicach ceramicznych o średnicy zewnętrznej D mniejszej (lub równej) 100 mm oraz o wysokości T mniejszej od 10 mm, nie można wyznaczyć częstotliwości drgań podstawowych f_1 [120]. Wobec powyższego, istnieją ograniczenia metody rezonansowej w postaci:

$$D > 100 \text{ mm} \quad (31)$$

$$T > 10 \text{ mm} \quad (32)$$

Dla badań eksploatacyjnych szczególne znaczenie ma warunek odtwarzalności metody, czyli jej zgodność z pomiarami badanego parametru innymi metodami [77]. Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje porównywalna zgodność wyników metody rezonansowej z innymi metodami akustycznymi (GrindoSonic oraz SonicComparator) oraz dwukrotnie mniejszy błąd pomiaru w porównaniu do metody piaskowej Mackensena [120]. Wartości modułu E , uzyskane z diagnostyki kontrolnej ściernic ceramicznych klasy „tarcze”, metodą akustyczną niskiej częstotliwości, mogą być zatem wykorzystywane do praktycznej oceny jakości wykonania tych narzędzi.

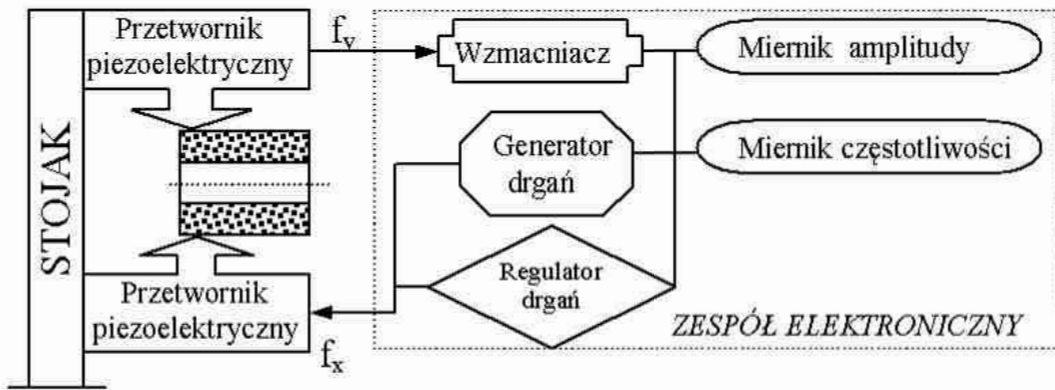
2.5. Metodyka diagnostyki kontrolnej ściernic małogabarytowych

W typoszeregu narzędzi ściernych o nazwie „ściernica” istnieje szeroka gama tych narzędzi, różniących się między sobą kształtem, zarysem części roboczej, jak i wymiarami (PN-91/M-59101). Relatywnie dużą grupę w produkcji standardowej tych narzędzi stanowią ściernice o małych rozmiarach (o średnicy zewnętrznej $D < 100$). Narzędzia tego typu są przeznaczone głównie do obróbki wewnętrznych powierzchni walcowych i kształtowych, np. pierścieni łożysk tocznych. Operacje tego typu realizowane są najczęściej na obrabiarkach zautomatyzowanych, gdzie narzędzie pracuje w zoptymalizowanych warunkach przy dużej prędkości obrotowej (ze względu na małą średnicę zewnętrzną). Stawiane zatem są mu duże wymagania odnośnie cech budowy (zgodnych z założonymi) i dużej powtarzalności tych cech w partii wyrobów. Istnieje więc potrzeba oceny jakościowej tych narzędzi, zwłaszcza jeśli chodzi o ich twardość. Zastosowana metod pomiaru winna być szybka, uniwersalna i opierać się na dobrze określonym kryterium pomiarowym.

Wykazano wcześniej, że takim kryterium jest moduł sprężystości wzdłużnej E , a skutecznym sposobem jego wyznaczenia jest diagnostyka kontrolna ściernicy metodą akustyczną. Omówiona wcześniej metoda akustyczna niskiej częstotliwości (rezonansowa) i jej oprzyrządowanie pomiarowe nie nadaje się do badań tego typu narzędzi. Dla ściernic o małych rozmiarach ($D < 100$ mm) nie można bowiem wykorzystać dotychczas omówionej metodyki postępowania badawczego, ponieważ, z punktu widzenia teorii drgań obiekty tego typu stanowią kształt przejściowy pomiędzy tarczą a prętem. Bardzo trudno jest zatem wydzielić częstotliwość podstawową drgań własnych takich obiektów przez ustalenie podpór w węzłach średnicowych tych obiektów. Stąd zachodzi konieczność oddzielnej metodyki postępowania przy badaniach akustycznych ściernic o małych rozmiarach (małogabarytowych).

W zespole badawczym GosNIIASh, w St. Petersburgu, pod kierownictwem prof. B. A. Głagovskiego zostało opracowane oprzyrządowanie pomiarowe do tego typu badań [29]. Rodzinę przyrządów określono ogólną nazwą Zvuk [109]. Do kraju można było sprowadzić przyrządy pomiarowe tego typu, nie udostępniana była jednak metodyka pomiaru. Została ona rozpracowana przez autora i opublikowana w ogólnodostępnym czasopiśmie technicznym [124].

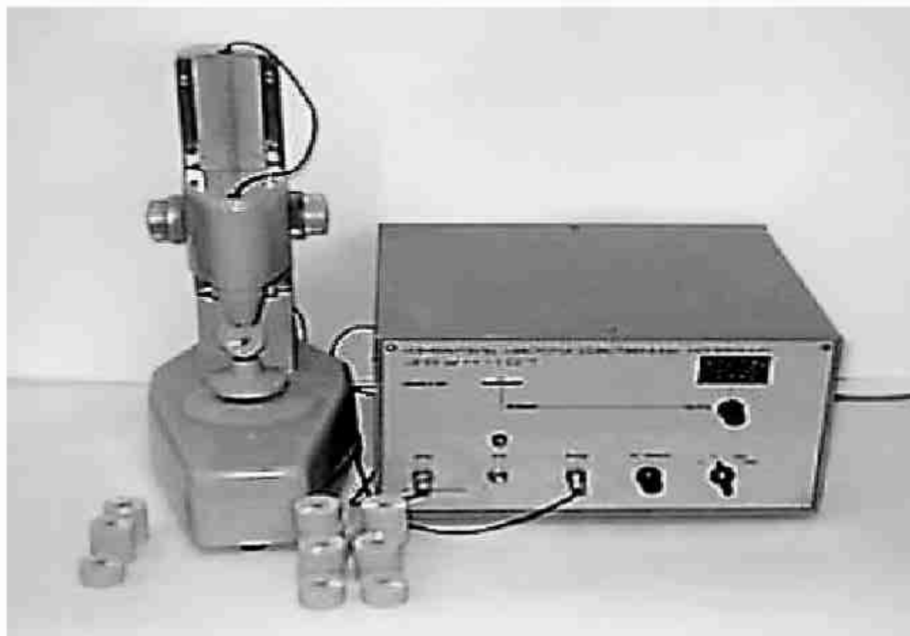
Przy użyciu rodziny przyrządów typu Zvuk (modele: 107, 108, 109, 202, 203) można wyznaczyć widmo spektralne częstotliwości drgań własnych ściernic o średnicy zewnętrznej od 3 do 1100 mm oraz osełek o długości do 250 mm [112]. Do badań ściernic o małych rozmiarach przeznaczony jest model Zvuk107, którego schemat ideowy pokazano na rys. 53.



Rys. 53. Schemat funkcjonalny przyrządu pomiarowego typu Zvuk 107

Fig. 53. Functional diagram of measuring instrument Type Zvuk 107

W skład przyrządu wchodzi stojak z przetwornikami piezoelektrycznymi oraz zespół elektroniczny ze wskaźnikiem optycznym. Generator drgań sinusoidalnych wytwarza drgania elektryczne w zakresie $5 \div 500$ kHz, których częstotliwość (f_x) może być płynnie regulowana. Drgania te w przetworniku piezoelektrycznym zamieniane są na drgania mechaniczne i przekazywane badanej ściernicy. Zostają one następnie przejęte i przekształcone ponownie na drgania elektryczne o częstotliwości f_y w drugim (identycznym) przetworniku piezoelektrycznym. Wzmocniony sygnał elektryczny przekazywany jest do miernika częstotliwości i miernika amplitudy. Jednocześnie do miernika częstotliwości podawana jest wartość częstotliwości f_x z generatora i następuje ich porównanie. Widok ogólny przyrządu Zvuk 107 przedstawiono na rys. 54.



Rys. 54. Widok przyrządu Zvuk 107 do badań ściernic małogabarytowych

Fig 54. View of a Zvuk 107 instrument for testing small size grinding wheels

Częstotliwość drgań wymuszonych z generatora dostraja się do częstotliwości drgań własnych ściernicy za pomocą regulatora drgań. W momencie zgodności tych częstotliwości następuje rezonans, przy którym szybko zwiększa się amplituda drgań, co jest obserwowalne na wskaźniku optycznym. Częstotliwość rezonansowa traktowana jest jako jedna ze składowych widma częstotliwości. Zmieniając częstotliwość drgań podawanych z generatora można przeszukać całe spektrum częstotliwości i wyznaczyć wszystkie składowe tworzące widmo.

W celu skrócenia czasu i zwiększenia pewności pomiarów opartych na badaniu widma częstotliwości, wskazane jest posiadanie informacji o przewidywanym położeniu poszczególnych składowych w widmie. Położenie to może być wyznaczone wstępnie dla konkretnej ściernicy z podanych niżej zależności. Do określenia wartości współczynników kształtu k_n , podanych tymi zależnościami, wprowadzane są wówczas projektowane wymiary ściernicy (średnica zewnętrzna D , wysokość T , średnica otworu H).

Położenie poszczególnych częstotliwości w widmie zależy od wartości współczynnika kształtu k_n , związanego z określoną postacią drgań [151]. Zatem wzór (27) może być przekształcony do postaci ogólnej jako:

$$f_n = k_n \cdot C_l = k_n \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (33)$$

gdzie: k_n – liczbowa wartość współczynnika kształtu odpowiedniej postaci n .

Częstotliwość drgań własnych, dla której k_n jest najmniejsze, jest najniższą składową widma częstotliwości. Następne z kolei są częstotliwości różnych postaci drgań (giętnych, skrętnych, płaskich) odpowiednio do wzrastającego k_n . Stąd można określić, jakiej postaci drgań odpowiada pierwsza, druga i wyższe częstotliwości tworzące widmo. Zbadano, że praktycznie dla ściernic małowabarytowych o średnicy $D = 3 \div 100$ mm istotne są tylko cztery częstotliwości [92]:

- f_d – częstotliwość drgań płaskich,
- f_1 – częstotliwość podstawowa drgań płaskich,
- f_{zg} – częstotliwość drgań gnących,
- f_{sk} – częstotliwość drgań skrętnych.

W ściernicach, których stosunek wysokości T do promienia zewnętrznego $R = (0,5 D)$ jest mniejszy od 1,2 można w widmie odnaleźć jeszcze dodatkowo częstotliwość f_2 . Jest to częstotliwość drgań gnących z jednym węzłem w kształcie okręgu.

Dla narzędzi ściernych oraz innych wyrobów małowymiarowych przemysłu maszynowego (tulei tarcz), charakteryzujących się współczynnikiem Poissona w zakresie $\nu = 0,15 \div 0,30$ i wymiarami gabarytowymi spełniającymi warunki:

$$0,24 < \frac{T}{R} < 5,33 \quad (34)$$

$$0,19 < \frac{H}{D} < 0,42 \quad (35)$$

ustalono empiryczne wartości współczynników kształtu k_n [29]. Przy tych wartościach k_n , wzory na poszczególne częstotliwości mają postać [124]:

$$f_d = \frac{\lambda}{H} \cdot C_l \quad (36)$$

$$f_1 = \frac{\omega_1}{D} C_l \quad \text{przy} \quad \frac{T}{R} < 1,6 \quad (37)$$

$$f_1 = \frac{\chi}{D} C_l \quad \text{przy} \quad \frac{T}{R} > 1,6 \quad (38)$$

$$f_{zg} = \frac{0,0572}{\sqrt{aDT}} \cdot C_l \quad (39)$$

$$f_{sk} = \frac{0,318}{T} \cdot C_l \quad (40)$$

$$f_2 = \frac{\omega_2}{T} \cdot C_l \quad (41)$$

Jak wynika z powyższych wzorów, położenie określonej częstotliwości w widmie zależy tylko od postaci współczynników kształtu k_n odpowiadającej tej częstotliwości f_n . Występujący w tych wzorach parametr C_l jest bowiem stale ten sam. Wykazano zatem, że wartość C_l można wykorzystywać bezpośrednio jako miarę jakości wykonywanych narzędzi [123].

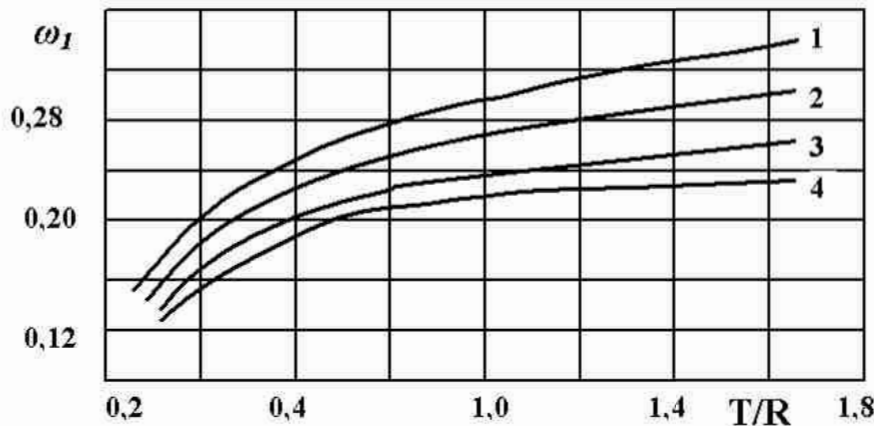
Wartości współczynników bezwymiarowych λ , χ , a , występujące w powyższych zależnościach, mogą być obliczone z wzorów [29]:

$$\lambda = 0,093 \left(0,425 - \frac{H}{D} \right)^{2,65} \quad (42)$$

$$\chi = -0,451 \frac{H}{D} + 0,416 \quad (43)$$

$$a = 0,0402 e^{0,554 \frac{T}{R}} - 0,0514 \quad (44)$$

Wartości współczynników bezwymiarowych ω_1 oraz ω_2 opisane są wykresami przedstawionymi na rys. 55 i rys. 56 [29].

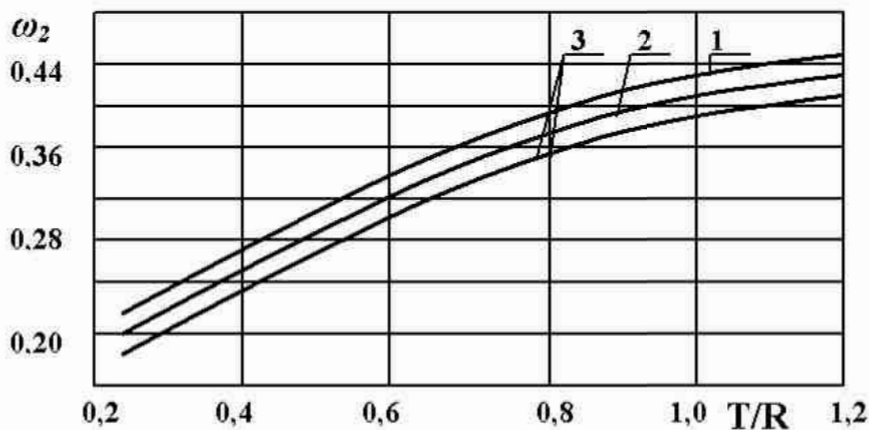


Rys. 55. Zależność współczynnika ω_1 od stosunku T/R dla wartości H/D [29]

1. = 0,19; 2. = 0,27; 3. = 0,35; 4. = 0,42

Fig. 55. Relation between coefficient ω_1 and ratio T/R for value H/D [29]

1. = 0,19; 2. = 0,27; 3. = 0,35; 4. = 0,42



Rys. 56. Zależność współczynnika ω_2 od stosunku T/R dla wartości H/D [29]

1. = 0,19; 2. = 0,27; 3. = 0,27

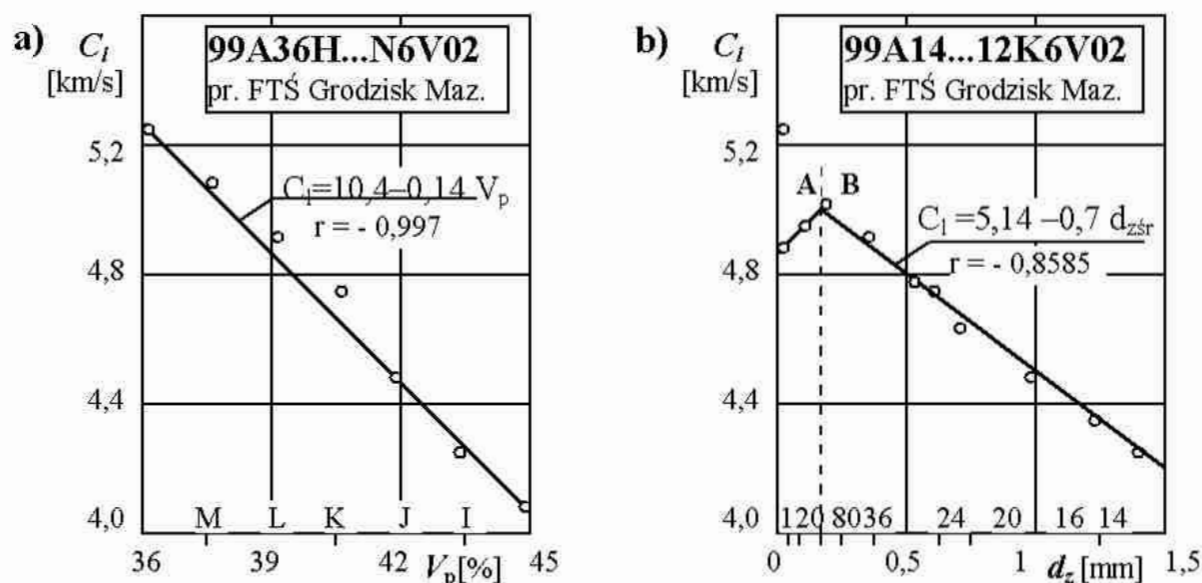
Fig. 56. Relation between coefficient ω_2 and ratio T/R for value H/D [29]

1. = 0,19; 2. = 0,27; 3. = 0,27

W zakresie parametru C_l (prędkości rozchodzenia się dźwięku) w ściernicach ceramicznych standardowej produkcji krajowej, przeprowadzono badania szerokiej gamy tych narzędzi [123]. Stwierdzono, że zależy on w sposób istotny od twardości (rys. 57a) oraz od numeru ziarna ściernego (rys. 57b)

Z przedstawionych wykresów wynika, że wraz ze wzrostem twardości ściernicy (według skali Nortona) rośnie prędkość propagacji fal sprężystych C_l . W zakresie badanych charakterystyk zmiana twardości o 1 klasę objawia się

zmianą parametru C_l przeciętnie o 150 m/s. Wartość ta może zatem być podstawą normowania jakości wykonania partii narzędzi o danej twardości.



Rys. 57. Wpływ twardości (a) oraz numeru ziarna ściernego (b) ściernic ceramicznych na prędkość rozchodzenia się dźwięku C_l

Fig. 57. Influence of hardness (a) and abrasive grain number (b) of ceramic grinding wheels on speed of sound C_l

Z przebiegu funkcji $C_l = f(\overline{d_z})$ wynika, że można wyróżnić dwa trendy: rosnący – dla bardzo drobnych ziaren – oraz malejący – dla ziaren o większych rozmiarach. Zasadne jest zatem przyjmowanie innych wartości wzorcowych parametru C_l dla numerów ziarna mniejszych od 100 oraz większych od tej wartości. Takie wartości wzorcowe zamieszczono w tab. II [92].

Tab.II. Wartości wzorcowe parametru C_l dla ściernic ceramicznych [92]

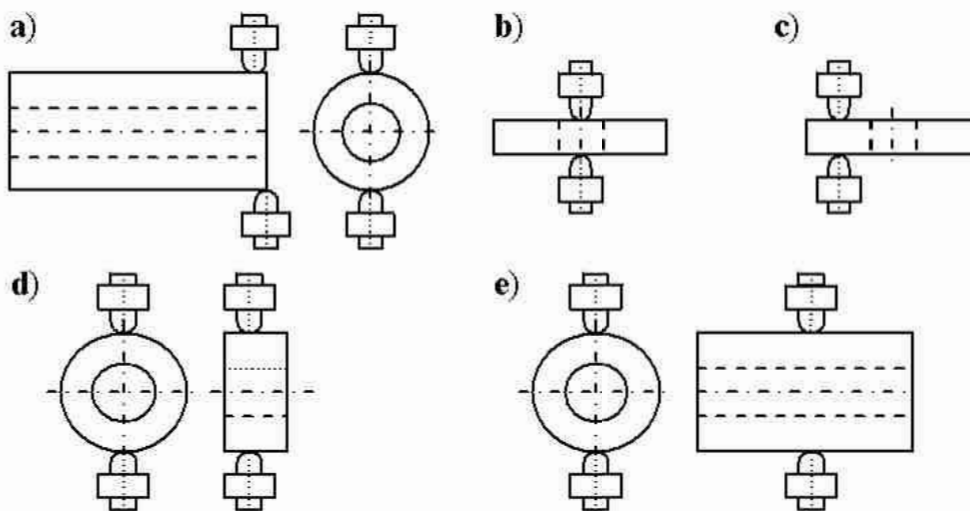
Tab.II. Standard values of parameter C_l ceramic grinding wheels [92]

Numer ziarna	C_l [km/s]	Twardość według skali Nortona								
		I	J	K	L	M	N	O	P	Q
< 100	Min	3,79	4,13	4,45	4,75	5,00	5,22	5,42	5,61	5,76
	Max	4,13	4,45	4,75	5,00	5,22	5,42	5,61	5,76	5,87
>100	Min	3,84	4,16	4,48	4,74	4,98	5,20	5,40	5,58	5,74
	Max	4,16	4,48	4,74	4,98	5,20	5,40	5,58	5,74	5,88

Podstawiając podaną wartość C_l dla badanej charakterystyki narzędzia, do zależności ujętych wzorami (52) do (57) obliczyć można poszczególne składowe widma częstotliwości. W zależności od wymiarów gabarytowych badanych ściernic (D , T , H) zmienia się jednak ich kolejność w widmie. Dla ustalenia tej kolejności celowe jest zaszeregowanie ich do jednej z klas [29]:

1. „Tarcze” – gdy $T < D$, tj. $T/R \leq 0,7$
2. „Walce” – gdy $T \sim D$, tj. $0,7 < T/R \leq 2,0$
3. „Pręty” – gdy $T > D$, tj. $T/R > 2,0$.

Dla ściernic klasy *tarcze*, częstotliwości drgań skrętnych f_{sk} nie uwidaczniają się w widmie. Jeżeli badana ściernica zostanie ustalona tak jak pokazano to na rys. 58d, to amplituda drgań f_d znacznie przewyższa amplitudy drgań o częstotliwościach f_1 i f_2 , a tym samym staje się najbardziej charakterystyczna i winna być przyjmowana jako częstotliwość pomiarowa. Dla ściernic z tej klasy stosuje się także ustalenia takie jak na rys. 58 b,c. Przy takim ustaleniu uwidacznia się najbardziej częstotliwość f_2 i ona może być brana pod uwagę przy pomiarach.



Rys. 58. Sposoby ustaleń ściernic podczas badania przyrządem Zvuk 107

Fig. 58. Methods of grinding wheel determination while testing with a Zvuk 107 device

Przy badaniu ściernic klasy *walce*, najbardziej charakterystyczne są częstotliwości f_d i f_1 . Jako częstotliwość pomiarową korzystnie jest przyjmować najniższą składową widma [123]. Kolejność poszczególnych składowych zależy od stosunku T/R . Sposób ustalenia ściernic należących do tej klasy – rys. 58 a, b.

Klasyfikując badane ściernice do klasy *pręty* należy je badać zgodnie z ustaleniami pokazanymi na rys. 58d, e. Dla tej grupy wyrobów widmo częstotliwości jest najbardziej złożone i uwidaczniają się wszystkie składowe. Podaje się jednak, że można oczekiwać takiej ich kolejności [29].

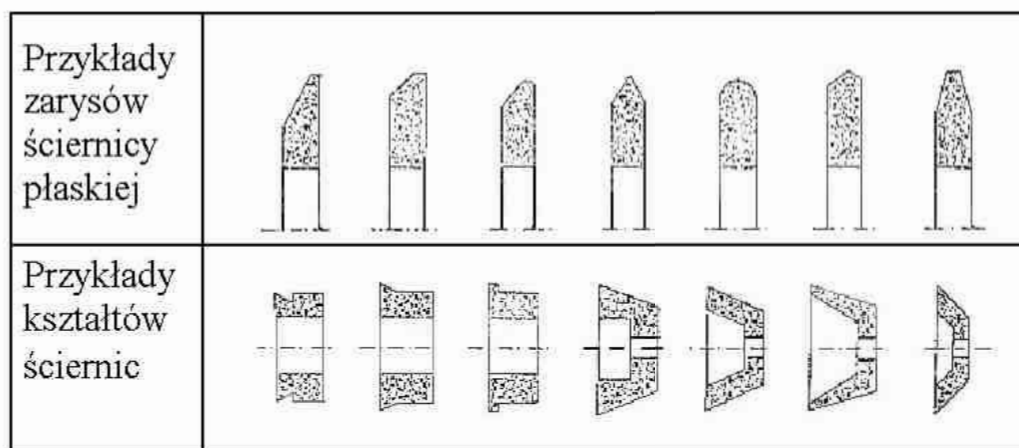
$$\begin{array}{ll}
 f_{zg} < f_d & \text{gdy } H/T < 0,29; & f_{sk} < f_{zg} & \text{gdy } H/R < 3,7 \\
 f_{sk} > f_d & \text{gdy } H/T > 0,29; & f_{sk} > f_{zg} & \text{gdy } H/R > 3,7 \\
 f_{sk} = f_d & \text{gdy } H/T = 0,29; & f_{sk} = f_{zg} & \text{gdy } H/R = 3,7
 \end{array}$$

Podane zależności analityczne umożliwiają ustalenie poszczególnych składowych widma częstotliwości ściernic małogabarytowych. Częstotliwości pomiarowe ściernic ceramicznych tej grupy w zdecydowanej większości wypad-

ków zawierają się w zakresie od 10 do 60 kHz, dlatego opisaną wyżej metodę określono jako: „akustyczna średniej częstotliwości”.

2.6. Metodyka diagnostyki kontrolnej ściernic kształtowych

Omówiona dotychczas metodyka akustycznego badania ściernic opierała się na założeniu, że narzędzia te mają zarys prostokąta, a ich kształt można opisać stosunkiem wymiarów gabarytowych H/D i D/T . Praktyka przemysłowa wymaga jednak także ściernic o innych zarysach i kształtach. W standardowych systemach oznaczania narzędzi ściernych spojonych (PN 91/M-59101) przewiduje się tego typu konstrukcje ściernic. Do wyznaczenia modułu E tego typu narzędzi nie można wykorzystać dotychczas omówionej metodyki, ponieważ posiadają one kształty i zarysy odbiegające od prostokąta – rys. 59.



Rys. 59. Przykłady ściernic kształtowych

Fig. 59. Examples of shaped grinding wheels

Zaistniała zatem konieczność wyeliminowania wpływu tych zmiennych parametrów kształtu ściernicy na wynik pomiaru częstotliwości drgań własnych. Wykazano, że dobre wyniki w tym zakresie można przynieść zastosowanie techniki ultradźwiękowej [126].

Fale sprężyste rozchodzące się w określonym ośrodku zaliczane są do ultradźwięków, jeżeli ich częstotliwość drgań jest większa od 20 kHz [107]. Sposób rozchodzenia się fali sprężystej w dowolnym ośrodku można uważać za określony do celów praktycznych, jeżeli znane są trzy wielkości [93]:

- prędkość rozchodzenia się fali,
- tłumienie przez ośrodek,
- rozkład ugięć fali wokół wewnętrznych niejednorodności ośrodka.

Wymienione wartości kształtują się pod wpływem ośrodka i parametrów fali ultradźwiękowej. Do własności i cech ośrodka stałego, które mogą mieć jakikolwiek związek z rozchodzeniem się fali sprężystej, zalicza się [152]:

- wewnętrzną strukturę ośrodka,
- rodzaj i formę składników ośrodka,
- własności fizyczne i mechaniczne ośrodka i jego składników.

Na największą uwagę zasługują dwie pierwsze cechy, ponieważ od nich w głównej mierze uzależnione jest tłumienie fali, warunkujące całokształt badań.

Jeżeli do jednorodnego, izotropowego i liniowo-sprężystego ośrodka o nieograniczonych rozmiarach zostanie wprowadzone źródło drgań harmoniczných, spowoduje ono powstanie fali naprężeń rozprzestrzeniających się w ośrodku w postaci dwóch niezależnych fal: podłużnych i poprzecznych. Prędkość propagacji fal poprzecznych zawsze jest mniejsza od prędkości fal podłużnych. Najbardziej użyteczne do pomiaru są fale podłużne (fale zagęszczeń i rozrzedzeń), przy których cząstki ośrodka drgają zgodnie z kierunkiem rozchodzenia się fal [93]. Dla większości zastosowań praktycznych potrzebna jest znajomość prędkości tych fal C_{lu} [152].

Prędkość rozchodzenia się fal podłużnych C_{lu} w ciałach stałych zależy od stosunku długości fali λ do rozmiarów ośrodka i dla ośrodka nieograniczonego jest określona wyrażeniem [93]:

$$C_{lu} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}} \quad [\text{m/s}] \quad (45)$$

gdzie:

- E – moduł Younga, Pa;
- ρ – gęstość ośrodka, kg/m^3 ;
- ν – liczba Poissona.

Ośrodek można uznać za nieograniczony, jeżeli spełniany jest warunek [93]:

$$\frac{2\lambda}{a} \leq 1 \quad (46)$$

przy czym:

- a – najmniejszy wymiar ośrodka w kierunku prostopadłym do kierunku propagacji fal (kierunku przyłożenia sond pomiarowych),
- λ – długość fali, wyrażająca się stosunkiem:

$$\lambda = \frac{C_{lu}}{f} \quad (47)$$

W przypadku ograniczenia obszaru sprężystego (jeden lub dwa wymiary a , b prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali są ograniczone) występują fale specjalnego typu. Wyróżnia się dwa rodzaje ośrodków ograniczonych: ośrodek dwuwymiarowy – *plytę* i *pręt* [153]. Ośrodek może być uznany za *plytę*, jeżeli:

$$\frac{2\lambda}{a} \geq 1 \quad (48)$$

Dla takiego ośrodka prędkość fal podłużnych wyraża się wzorem

$$C_{lu} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1+\nu^2)}} \quad (49)$$

Ośrodek może być uznany za *pręt*, jeżeli

$$\frac{2\lambda}{3a} \geq 1 \quad (50)$$

i wówczas prędkość rozchodzenia się fali podłużnej opisuje zależność

$$C_{lu} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (51)$$

Drugi z wymiarów (*b*) poprzecznych do kierunku propagacji fali (zarówno dla *płyty*, jak i *pręta*), powinien przy tym spełniać warunek

$$\frac{b}{5a} \geq 1 \quad (52)$$

Narzędzia ściernic są typowymi tworzywami niejednorodnymi. Spośród innych tworzyw tego typu wyróżniają się jednak bardziej skomplikowaną budową. Do charakterystycznych cech tej budowy należy zaliczyć [38]:

- dużą różnorodność wymiarów, udziałów i własności składników,
- różne rozmieszczenie i połączenie ziaren mostkami spoiwa, a przede wszystkim różną zawartością fazy gazowej w postaci porów o nieznanymi kształtach.

Taka niejednorodna budowa wpływa w sposób istotny na tłumienie fal ultradźwiękowych. Przy stosowaniu techniki ultradźwiękowej do badania materiałów o dużym tłumieniu, np. betonu, ceramiki zaleca się stosowanie fal o niższej częstotliwości ($f < 1$ MHz) [11]. W materiałach tych prędkość propagacji fal podłużnych wynosi od 3000 do 5000 m/s. Do badań ceramiki stosowane są zatem fale sprężyste o długościach centymetrowych. Maksymalne rozmiary konwencjonalnych ziaren ściernic są rzędu milimetrów (2,5–3 mm), a praktycznie stosowane rzędu dziesiątych i setnych milimetra. Tak więc długość fal podłużnych podczas badań ściernic ceramicznych metodą ultradźwiękową byłaby o dwa rzędy (a co najmniej o jeden rząd) wielkości większa od rozmiarów ziaren. Można zatem sformułować kolejne prawo metodologiczne:

„Z punktu widzenia propagacji fal ultradźwiękowych ściernice ceramiczne o konwencjonalnej budowie mogą być traktowane jako jednorodne materiałowo”.

Traktując ściernice ceramiczne (o konwencjonalnej budowie) makroskopowo jako jednorodne, nie popełni się więc błędu statystycznie istotnego po warunkiem, że długość fali ultradźwiękowej stosowanej podczas badań będzie dużo większa od rozmiarów ziaren ściernych. Przy takim założeniu do ściernic mogą być zastosowane wzory na prędkość propagacji fali ultradźwiękowej, wyprowadzone dla ośrodków jednorodnych i izotropowych. Wobec powyższego, wzór ogólny na moduł E dla wyznaczany metodami ultradźwiękowymi może być zapisany jako [126]:

$$E = A \cdot C_{lu}^2 \cdot \rho \quad (53)$$

gdzie:

A – współczynnik poprawkowy, uwzględniający postać ośrodka (*płyta, lub pręt*).

Przy spełnianiu warunków (50) i (52), dotyczących wymiarów poprzecznych do kierunku propagacji fali (kierunku przyłożenia sond), wartość $A = 1$, stąd:

$$E = C_{lu}^2 \cdot \rho \quad (54)$$

Gęstość narzędzi ściernych została przeanalizowana w podrozdziale 2.3 (wzór 26). Do wyznaczenia modułu E niezbędna jest zatem znajomość prędkości propagacji fali ultradźwiękowej C_{lu} w badanej ściernicy. W tym zakresie praktyczne znaczenie mają cyfrowe pomiary prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych, oparte na wyznaczaniu czasu przejścia przez znaną drogę s . Mierzy się czas t między impulsem początkowym, a impulsem końcowym (lub echem dna), który jest dany wzorami: (55) – dla metody przepuszczania, lub (56) – dla metody echa [93]:

$$t = \frac{s}{C_{lu}} \quad [\text{s}] \quad (55)$$

$$t = \frac{2s}{C_{lu}} \quad [\text{s}] \quad (56)$$

W większości przypadków testery wykorzystywane do cyfrowych pomiarów prędkości C_{lu} , zbudowane są na zasadzie metody przepuszczania. Zatem zasadne jest posługiwanie się wzorem (55), przekształconym do postaci:

$$C_{lu} = \frac{s}{t} \quad [\text{m/s}] \quad (57)$$

Po podstawieniu tej wartości do wzoru (70) otrzymujemy zależność na moduł E

$$E = \left(\frac{s}{t} \right)^2 \cdot \rho \quad [\text{GPa}] \quad (58)$$

Do pomiaru czasu (t) przejścia fali ultradźwiękowej przez ściernicę wykorzystano tester materiałowy typ 513 pr. UNIPAN Warszawa. Przykład diagnostyki kontrolnej ściernic kształtowych tym testerem pokazano na rys. 60.



Rys. 60. Sposób diagnostyki ściernic kształtowych metodą ultradźwiękową
Fig. 60. Methods of diagnosis for shaped grinding wheels by ultrasonic method

Badania tym testerem oparte są na metodzie przepuszczania impulsu ultradźwiękowego przez badany materiał i odebraniu go po przejściu określonej drogi s . Czas przejścia impulsu mierzy się za pomocą układów elektronicznych ze wskaźnikami cyfrowymi. W metodzie przepuszczania stosuje się dwie głowice pomiarowe. Jedna służy do wytwarzania fal ultradźwiękowych, druga do odbioru. W zależności od rodzaju nadawanych i odbieranych fal rozróżnia się głowice fal podłużnych i poprzecznych. W zależności od wykonania występuje podział głowic na normalne – wprowadzające fale prostopadle do powierzchni badanego wyrobu, oraz skośne – wprowadzające falę ukośnie względem powierzchni. W badaniach narzędzi ściernych najkorzystniej jest stosować głowice normalne na fale podłużne. Głowice typu 541, stosowane w testerach materiałowych produkcji UNIPAN, mają oznaczenia dotyczące rodzaju pracy (nadawcza, odbiorcza) średnicy przetwornika oraz częstotliwości pomiarowej, np. R0140 oznacza: normalna głowica odbiorcza na fale podłużne, o częstotliwości pomiarowej $f = 0,1$ MHz i średnicy powierzchni czynnej głowicy $d = 40$ mm [126]. Konieczność stosowania do badań ściernic głowic pomiarowych o tak wysokiej częstotliwości uprawnia do określenia opracowywanej metody jako: „akustyczna wysokiej częstotliwości”.

W materiałach niejednorodnych, a zwłaszcza polikrystalicznych, tak jak to ma miejsce w przypadku narzędzi ściernych, występuje duże tłumienie fal ultradźwiękowych. Ogólnie przyjmuje się, że przeważający wpływ na wartość współczynnika tłumienia α mają straty energii wywołane rozpraszaniem [152].

Największy wpływ na ten rodzaj strat ma związek pomiędzy długością fali λ , a średnim rozmiarem ziarna d_z . Jeżeli długość fali λ jest o wiele większa niż średni rozmiar ziarna $\overline{d_z}$, to wtedy ma miejsce tzw. rozproszenie Rayleigha. Straty wywołane rozproszeniem Rayleigha są proporcjonalne do trzeciej potęgi średniego wymiaru ziarna [93]. Zatem im drobniejsze ziarno ściernic, tym mniejsze tłumienie fali, co w konsekwencji winno się objawić większą wartością parametru C_{lu} . To duże tłumienie fali ultradźwiękowej zmusza jednak do stosowania głowic o większej powierzchni czynnej (zwykle: $d \geq 40$ mm). Utrudnia to dokonywanie pomiarów na powierzchniach zakrzywionych ściernicy, np. w otworach ściernic o średnicy H do 100 mm głowice nie mieszczą się. Należy więc oczekiwać, że przy badaniach ultradźwiękowych ściernic kształtowych za powierzchnie do pomiarów będą zwykle przyjmowane powierzchnie dna. Powierzchnie te muszą być jednak równe co najmniej powierzchni czynnej głowicy ($d = 40$ mm). W innych przypadkach może być konieczne dopasowanie powierzchni głowic do powierzchni narzędzia (np. przez stosowanie specjalnych nakładek), lub przejście na powierzchnie boczne.

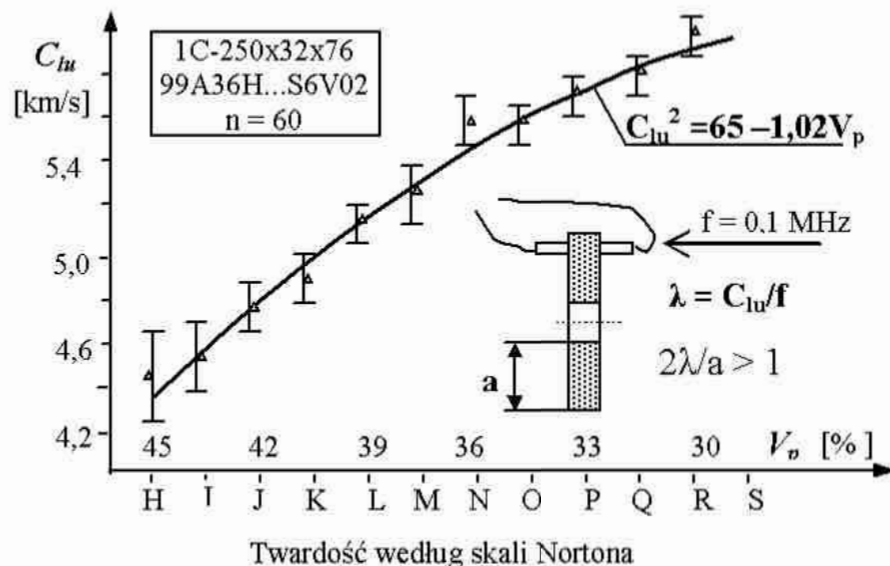
Istotnym czynnikiem przy każdym badaniu ultradźwiękowych jest stan powierzchni badanego przedmiotu. Dotyczy to zwłaszcza jednorodności stereometrycznej, gdyż przy różnym stopniu chropowatości uzyskuje się różną wykrywalność, przez co wyniki badań mogą być nieporównywalne [107]. Mówi się wówczas o odbiciu dyfuzyjnym, którego przeciwieństwem jest odbicie zwierciadlane. Zachodzi ono wówczas, gdy wysokość nierówności badanej powierzchni jest mniejsza od $1/20$ długości fali ultradźwiękowej λ .

Orientacyjnie można przyjąć, że wysokość nierówności powierzchni narzędzi ściernych odpowiada wymiarowi charakterystycznemu ziarna. Maksymalna wysokość nierówności w narzędziach ściernych, praktycznie stosowanych, wynosi zatem 2 mm. Aby zachodziło odbicie zwierciadlane, celowe jest więc, by długość podłużnych fal ultradźwiękowych wprowadzanych do narzędzia nie była mniejsza niż 40 mm. Jeżeli wziąć pod uwagę, iż stosowana częstotliwość pomiarowa wynosi 0,1 MHz, to (dla otrzymania poprawnych wyników) najmniejsza prędkość propagacji fal ultradźwiękowych nie powinna być mniejsza niż 4000 m/s [126].

Chropowate powierzchnie narzędzi ściernych wymagają więc szczególnie dobrego sprzężenia akustycznego, za pomocą określonych środków. W literaturze zaleca się używanie takich środków sprzęgających, jak: woda, oleje wszystkich gatunków, pasty, mieszaniny wosku i oleju lub inne [93]. Jakość sprzężenia w dużym stopniu zależy też od względnej grubości warstwy sprzęgającej między głowicą a powierzchnią badanego przedmiotu. W badaniach narzędzi ściernych głowice są prowadzone ręcznie i w bezpośrednim kontakcie z powierzchnią. Jest to więc kontaktowe sprzężenie akustyczne, które charakteryzuje się znacznie mniejszą grubością warstwy sprzęgającej niż długość fali. Z szerokich badań autora nad efek-

tywnością środków sprzęgających do ultradźwiękowych badań narzędzi ściernych wynika, że najefektywniejszym jest stosowanie wodnego roztworu kleju malarskiego [126]. Zapewnia on dobre sprzężenie akustyczne, a jednocześnie może być w prosty sposób usunięty z powierzchni (przez wypłukanie) lub pozostawiony na niej bez żadnych widocznych efektów wizualnych. Nie jest zalecane natomiast używanie do badań olejów i ich pochodnych jako środków sprzęgających.

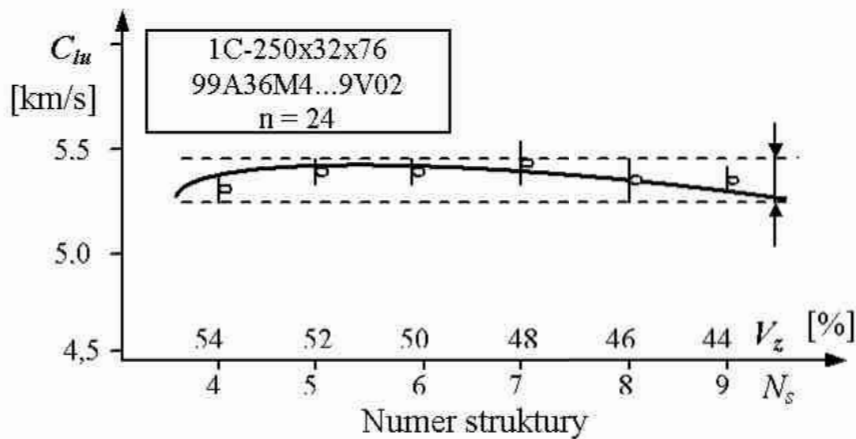
Aby sprawdzić prawidłowość diagnostyki narzędzi ściernych metodą ultradźwiękową, przeprowadzono szerokie badania porównawcze na ściernicach o znanych wartościach modułu E (wyznaczonego metodą niskiej częstotliwości). Były to ściernice płaskie typu 1C-250x32x7699A36H...S6V02. Ściernice te ze względu na swoje wymiary gabarytowe spełniały warunek ujęty wzorem (48). Z punktu widzenia teorii drgań ultradźwiękowych mogły być zatem traktowane jako ośrodek ograniczony typu *plyta*. Zależność prędkości propagacji fal ultradźwiękowych C_{lu} od twardości ściernic pokazano na rys. 61.



Rys. 61. Wpływ twardości ściernic na prędkości fali ultradźwiękowej C_{lu}
Fig. 61. Influence of grinding wheel hardness on ultrasonic wave velocity C_{lu} .

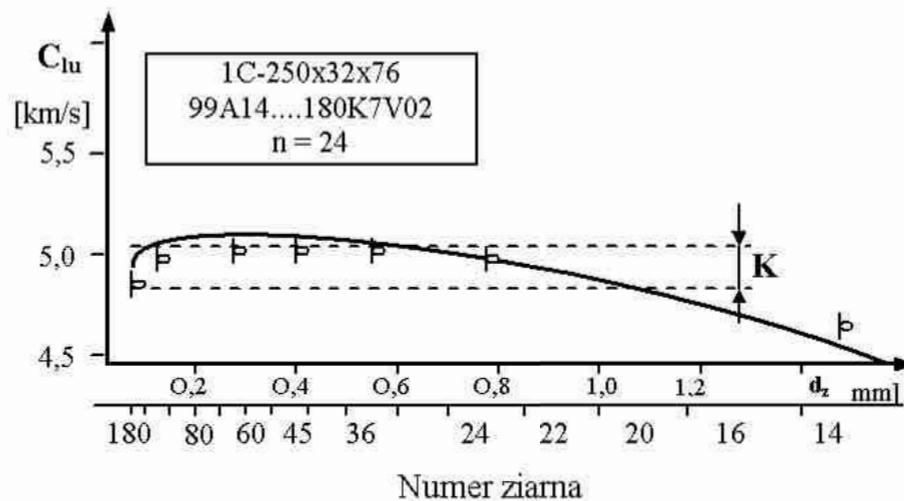
Wynika z niego, że prędkość fali ultradźwiękowej C_{lu} dla ściernic ceramicznych z elektrokorundu mieści się w zakresie: od 4200 m/s (dla niskich twardości) do 6400 m/s (dla wysokich twardości). W obszarze najczęściej stosowanych twardości (I–O) wzrost twardości o jeden stopień (według skali Nortona) objawia się zwiększeniem prędkości propagacji fali ultradźwiękowej przeciętnie o 150 m/s. Przy ocenie jakości wartość ta może być wykorzystana do ustalania zmienności systemowej i skalowania wzorców, opartych bezpośrednio o parametr C_{lu} .

Prędkość fali ultradźwiękowej (a w konsekwencji wartość modułu E) zależy nie tylko od twardości (udziału objętościowego por V_p) narzędzia ściernego, ale także od jego struktury i wielkości ziarna ściernego. Zależność parametru C_{lu} od struktury pokazano na rys. 62. Rysunek 63 pokazuje natomiast wpływ wielkości ziarna ściernego na ten parametr.



Rys. 62. Zależność prędkości fali ultradźwiękowej od struktury ściernic

Fig. 62. Dependence between ultrasonic wave velocity and grinding wheel structure



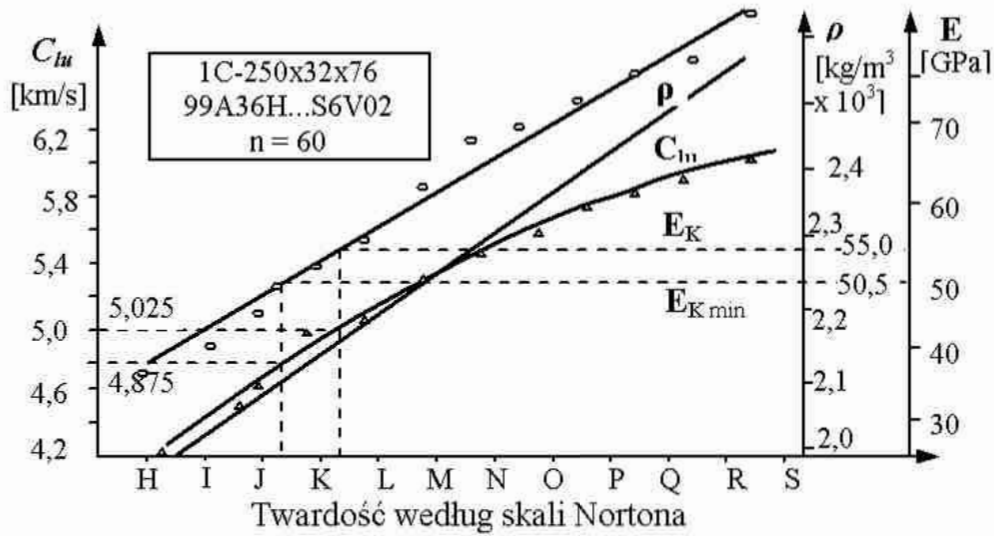
Rys. 63. Zależność prędkości fali ultradźwiękowej od numeru ziarna ściernego

Fig. 63. Dependence between ultrasonic wave velocity and abrasive grain numbers

Z analizy rys. 62 wynika, że zależność prędkości C_{lu} od struktury N_s (udziału objętościowego ziarna V_z) ściernicy ceramicznej jest słaba i uwikłana różnym oddziaływaniem ilości ziarna ściernego na współczynnik tłumienia (pochlaniem, rozproszeniem i odbiciem od granic). Przy zmianie struktury o 6 numerów (dla całego wykorzystywanego praktycznie zakresu) zmiana prędkości C_{lu} jest rzędu 150 m/s. Odpowiada to zmianie tego parametru, wywołanej zmianą twardości o jeden stopień (M) według skali Nortona.

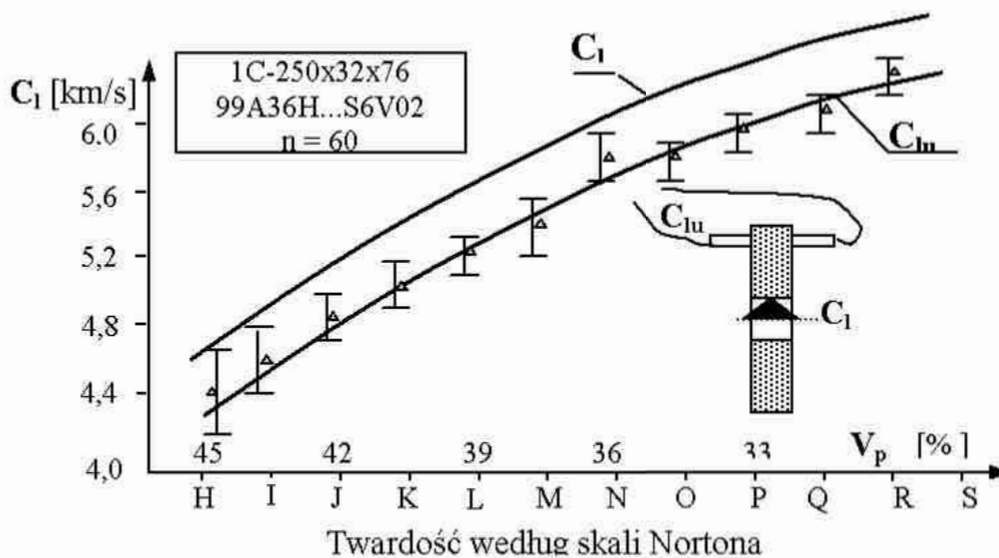
Zależność prędkości C_{lu} od wielkości ziarna ściernego (rys. 63) ma także trend niejednoznaczny. Przy bardzo drobnych ziarnach ściernych (przy numerze ziarna < 80) funkcja $C_{lu} = f(d_z)$ jest rosnąca, natomiast dla ziaren o większych rozmiarach – malejąca. Potwierdza to dane literaturowe, że ze wzrostem wielkości ziarna zwiększa się tłumienie fali ultradźwiękowej.

Mając wyznaczoną prędkość fal C_{lu} , po zważeniu badanych ściernic i obliczeniu ich gęstości ρ , z wzoru (54) uzyskuje się wartości modułu E tych narzędzi. Przebiegi wartości tych parametrów pokazano na rys. 64.



Rys. 64. Wpływ twardości ściernic na moduł E wyznaczany ultradźwiękowo
Fig. 64. Influence of grinding wheel hardness on module E determined by ultrasonic method

Na podstawie analizy danych zamieszczonych na rys. 63 można wnioskować, iż bardziej zasadne jest przyjmowanie (jako parametru diagnostycznego) modułu E niż prędkość fali ultradźwiękowej C_{lu} , ponieważ można go opisać modelem regresji liniowej, co jest korzystniejsze przy skalowaniu wzorców. Porównanie parametru C_l z obu badanych metod zobrażowano na rys. 65.

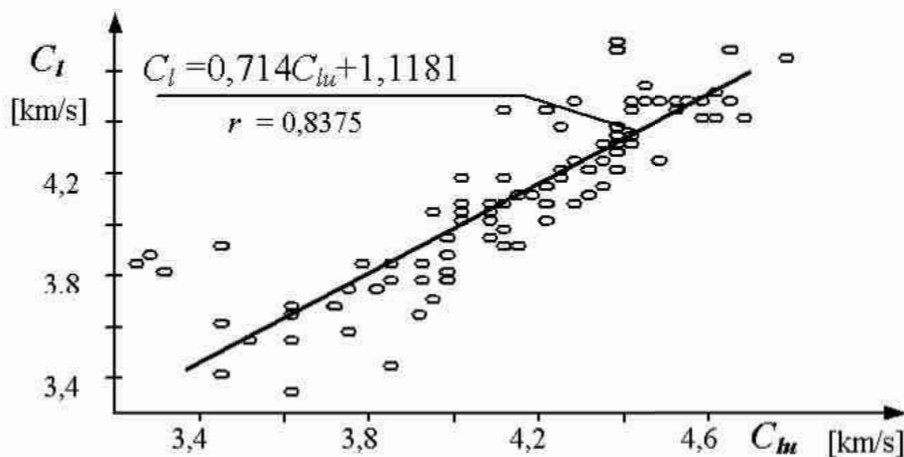


Rys. 65. Porównanie prędkości fal podłużnych wyznaczonych metodą ultradźwiękową C_{lu} oraz rezonansową C_l

Fig. 65. Comparison of longitudinal waves determined by ultrasonic method C_{lu} resonance method C_l

Z powyższego rysunku wynika, że charakter zależności prędkości fali podłużnej w funkcji twardości ściernic dla obu rozpatrywanych metod jest identyczny, natomiast istnieją różnice ilościowe. Wynikają one z przyjęcia w metodzie ultradźwiękowej określonej wartości współczynnika poprawkowego A , którego zmienną jest liczba Poissona ν (wzór 53). Dla narzędzia traktowanego jako jednorodny ośrodek typu *pręt* przyjęto $A = 1$, a traktowanego jako *plyta* $A = 0,94$. W rzeczywistości dla danego przypadku $A = 0,90$. Dla takiej wartości A występuje zgodność wyników z obu metod.

Aby sprawdzić zgodność wyników metody ultradźwiękowej w zastosowaniu do narzędzi ściernych nie spełniających warunku ujętego wzorem (48), przeprowadzono badania porównawcze na ściernicach małogabarytowych, badanych uprzednio metodą akustyczną niskiej częstotliwości. Na rys. 66 pokazano korelację prędkości fal podłużnych ściernic małogabarytowych o charakterystyce: 1C-35x20x10-CrA80JV02, badanych metodą ultradźwiękową (C_{lu}) przy użyciu specjalnej nakładki na głowice pomiarowe oraz metodą akustyczną średniej częstotliwości (C_l) na przyrządzie Zvuk -107 [128].



Rys. 66. Korelacja prędkości fal uzyskanych metodą akustyczną średniej częstotliwości (C_l) i ultradźwiękową C_{lu} w partii ściernic ($n = 100$ szt.)

Fig. 66. Correlation waves velocity obtained by acoustic method of average frequency (C_l) and ultrasonic method C_{lu} in a lot of grinding wheels ($n = 100$ pcs.)

Z analizy tych danych, dotyczącej zgodności prędkości fal podłużnych C_l w ściernicach o jednakowej charakterystyce (5 partii po $n = 100$ szt.) wynika, że mimo niespełniania warunku ujętego wzorem (48), nie ma różnic statystycznie istotnych pomiędzy wynikami uzyskanymi z metody ultradźwiękowej oraz metody akustycznej średniej częstotliwości. Najmniejszy współczynnik korelacji wynosi $r = 0,8375$ (rys. 66), a przeciętny błąd pomiaru dla 5 badanych partii nie przekracza 8%. Można więc twierdzić, że metoda ultradźwiękowa daje poprawne wyniki i może być stosowana do diagnostyki kontrolnej ściernic ceramicznych o kształtach odbiegających od prostokątnego.

ROZDZIAŁ 3

OCENA JAKOŚCI TYPU ŚCIERNIC CERAMICZNYCH

Systemowa ocena jakości jest podstawą tworzenia i weryfikacji stanu realizacyjnego wszystkich aspektów strategicznych działań na rzecz jakości w przedsiębiorstwie – rys. 67.



Rys. 67. Strategiczne działania na rzecz jakości

Fig. 67. Strategic actions on behalf of quality

Pierwszym z etapów systemowej organizacji działań na rzecz jakości, które określa się jako „zarządzanie przez jakość” lub TQM, jest planowanie [150]. TQM (Total Quality Management) jest bowiem formą „zarządzania przez cele”, gdzie celem jest ciągły wzrost jakości produktu, a planowanie jakości pociąga za sobą zsumowanie potrzeb klientów, podstawowych procesów i ogólnych rezultatów [145]. W fazie planowania, na etapie rozwiązań koncepcyjnych, powstaje wartość, która określa jakość typu (projektową) Q_p i stanowi o klasie wyrobu. Klasa ta wynika ze stopnia zgodności zaprojektowanych cech wyrobu z wymaganiami użytkownika. W zależności od klasy wyrobu (w przyjętej skali jakości) może mieć on lepszą lub gorszą przydatność użytkową, a tym samym wyższą lub niższą jakość.

Aby czymś zarządzać, trzeba to oceniać, a podstawą właściwej oceny jest pomiar. Ilościowe wartościowanie jakości, pozwala na porównywanie stanu osiągniętego ze stanem założonym w aspekcie przyjętego kryterium [69].

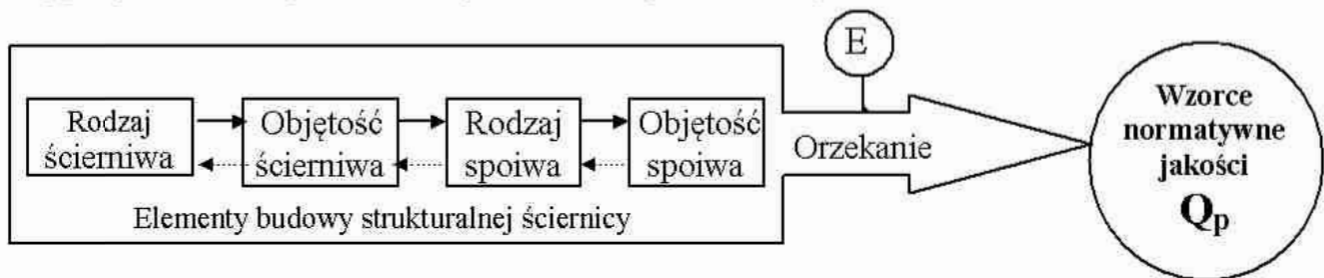
W prowadzonej ocenie jakości ściernic ceramicznych zastosowano *metodę reprezentatywnego kryterium*. W kwalimetrii pod pojęciem tym rozumie się określanie poziomu jakości za pomocą stanu jednej mierzalnej właściwości [68]. Takim reprezentatywnym i mierzalnym kryterium, dającym informację o stanie zbiorczym spojonych ze sobą elementów ściernicy, jest moduł Younga.

Za przyjęciem takiego postępowania przemawia racja prakseologiczna. Głosi ona, że: „łatwo dokonać wyboru przedmiotu spośród innych wówczas, gdy

ocenia się ten zbiór pod względem jednego kryterium oraz gdy się dysponuje pomiarem dającym informację o nasileniu cechy stanowiącej ośnowę oceny” [30]. Z racji prakseologicznej wynika postulat logiczny, będący efektem badań opisywanych w niniejszym rozdziale: „czyń q jeśli chcesz p ”.

3.1. Jakość typu jako stan intencjonalny

Każda ocena, traktowana systemowo, winna więc być poprzedzona dokładnym określeniem celu, do którego ma doprowadzić. Celem takim, w rozpatrywanym aspekcie jakościowym, jest wyznaczenie skali wzorców normatywnych, związanych z przyjętym kryterium. Ocena jakości typu (projektowej) Q_p służy do określenia zgodności rzeczywistych cech wyrobu z cechami intencjonalnymi projektanta, zawartymi w dokumentacji tego wyrobu. Jest to zatem ocena porównawcza: tego „co jest,” z tym „co miało być”. Istnieje więc jakiś stan zbiorczy elementów danego obiektu, określający jego strukturę, który ma zapewnić osiągnięcie intencjonalnie wyznaczonego celu – rys. 68.



Rys. 68. Model powiązań systemowych przy ocenie jakości typu Q_p

Fig. 68. Model of system connections at quality assessment Type Q_p

Projektowanie to przekładanie myśli i idei na konstruktywne struktury. Pojęcie struktury jest bardzo złożone. Ogólnie biorąc przez strukturę rozumie się: 1) układ części w pewnej całości, 2) związki, stosunki części do części i części do całości, 3) części mające pewne cechy pochodne od całości [71].

Dla prowadzonych rozważań istotne jest to trzecie sformułowanie. To bowiem, jak się zachowuje aktywne ziarno ściernie podczas wykonywania pracy skrawania, jest pochodną zintegrowanej sprężystości całego układu (ściernicy). Traktowanie jakości jako „wynurzającej się cechy systemu” wymaga więc, aby „części” nabierały właściwości od „całości”.

Przy rozważaniu jakości projektowej celowe jest rozróżnianie dwóch grup struktur: 1) indukcyjnej i 2) efektywnej, zwanej inaczej intencjonalną i domyślną. Struktura indukcyjna charakteryzuje się tym, że cechy jej są dane w doświadczeniu, czyli jest to wynik stanu rzeczywistego. Struktura intencjonalna natomiast jest wynikiem efektywnościowego myślenia człowieka [116].

Struktury intencjonalne są domyślne, wymagają więc znalezienia takich ogólnych idei, które pozwoliłyby dane projektowe powiązać w określoną struk-

ture. Ideami tymi są najczęściej pewne właściwości użytkowe, które chce się uzyskać z danej struktury. Właściwości te są pochodną właściwości użytkowych poszczególnych elementów i efektu synergicznego.

W ramach przyjętych wzorców normatywnych struktury systemowe są związane pewną własną typicznością. Przez „typiczność” należy rozumieć charakterystyczne dla danej struktury właściwości strukturalne, które są niezmiennie takie same, niezależnie od podziału obiektu. Wydobycie istoty tej „typiczności” jest celem badań prezentowanych w niniejszym rozdziale.

Struktury systemowe przez zastosowanie określonej metody pomiaru stają się dostępne poznaniu, dlatego też uprawnione jest nazwanie takiego podejścia ujęciem fenomenologicznym. Tego rodzaju postępowanie umożliwia dotarcie do fenomenu, czyli „istoty rzeczy”. Rzeczy empiryczne są bowiem nośnikami (egzemplifikacjami) fenomenów, czyli rzeczy samej [41]. Aby poznać fenomen, należy skoncentrować się na nim, a nie na empirycznych przejawach rzeczy, wyrażonych przez pojedyncze egzemplarze. W zakresie tego typu badań Husserl zaleca przeprowadzenie tzw. „redukcji fenomenologicznej”. Pierwszy jej etap polega na odrzuceniu, zawieszeniu ważności („wzięciu w nawias”) tego, co utrudnia nam poznanie lub nie jest całkowicie pewne. Krok następny redukcji polega na odnalezieniu takich cech rzeczy, które są trwałe, niezmiennie i pewne – cechy te tworzą istotę rzeczy. Skutkiem tego rodzaju badań jest zarówno poznanie tych struktur, czynników, determinują dany stan, jak również tworzenie intencjonalnych abstraktów (modeli), które podają: „co czynić, aby osiągnąć dany stan”.

Trwałą, niezmienną i pewną cechą budowy ściernicy jest to, że w wyniku połączenia ziaren ściernych spoiwem tworzy się struktura charakteryzująca się określonym modułem Younga E . Stanowi on fenomen (istotę) sprężystości. Sprawą wymagającą zawieszenia ważności na tym etapie badań jest fakt zmienności tego kryterium dla różnych egzemplarzy wyrobu, wytworzonych w wyniku jednej i tej samej koncepcji projektowej. Interpretacja każdej koncepcji projektowej nieuchronnie prowadzi do pytania o jej ukryty wymiar, czyli znaczenie.

Warstwę znaczeniową można rozpatrywać na trzech poziomach [69]:

1. intencji, jaką twórca pragnie wyrazić – projekt,
2. jej formalnej realizacji – wykonanie,
3. sposobu jej odczytywania przez odbiorcę – użytkowanie.

Intencją projektanta narzędzi ściernego jest takie dobranie jego cech budowy, aby spełnić określone zadanie obróbkowe. Pochodną tej intencji jest wytworzona struktura narzędzia. Każda więc struktura to swego rodzaju medium, w które zostaje wpisany komunikat i które ponownie staje się komunikatem na styku z odbiorcą. Można powiedzieć, że intencje twórcy są „kodem genetycznym struktury”, generującym jej własności.

Idee zawarte w wyrobie są odczytywane przez użytkownika. Zapis idei zawsze dokonuje się w innym czasie, niejednokrotnie w innym kontekście niż jej odczytywanie. Dlatego pomiędzy intencją projektanta a interpretacją odbiorcy istnieje rozdźwięk, mniejszy lub większy dystans (intelektualny i czasowy). Niemniej jednak pewne własności zawarte w charakterystykach technicznych narzędzi ściernych są trwałe, powszechnie znane i podobnie odczytywane w określonych kręgach.

Realizacja intencji projektanta odbywa się przez zastosowanie określonej technologii wytwarzania, zasad recepturowania i przy użyciu świadomie dobranych materiałów. Od stopnia świadomości i umiejętności wykonawcy zależy, czy transpozycja idei w strukturę przedmiotową sprawi, że dana struktura stanie się nośnikiem intencjonalnych znaczeń. Jednak trzeba pamiętać o tym, że każdy stan intencjonalny funkcjonuje wyłącznie jako część sieci innych stanów intencjonalnych. Przez funkcjonowanie rozumie się to, że określa on swoje warunki satysfakcji w relacjach do całości, na które składają się inne stany intencjonalne [116]. Oznacza to, że nawet najpełniejsza satysfakcja z posiadanego narzędzia, zgodnego w całej rozciągłości ze swoim intencjonalnym pierwowzorem, nie stanowi dowodu na osiągnięcie stanu satysfakcji z systemu jego użytkowania [137].

W definiowaniu struktury, jako całości, zawierają się jej składniki, stosunki i funkcje łączące je ze sobą w określony sposób. Nie zawsze jednak udaje się określić, jakie są stosunki, które te składniki struktury łączą w całość. Ma to miejsce właśnie w zakresie konstrukcji narzędzi ściernych, gdzie występuje duża losowość połączeń ziaren ściernych mostkami spoiwa. Dlatego też niezbędna jest doświadczalna weryfikacja stanu rzeczywistego danej struktury.

Do budowy standardowych ściernic ceramicznych wykorzystywane są konwencjonalne materiały ściernic: tlenek glinu (Al_2O_3) lub węgiel krzemu (SiC) oraz spoiwo amorficzne (typu szkło). Do szczególnych zastosowań wytwarza się te narzędzia z materiałów modyfikowanych. W zakresie ściernic mogą nimi być np. korundy spiekane typu SG, czy też monokrystaliczne ziarna węgla krzemu. W zakresie spoiw modyfikacja ta dotyczy zasadniczo zamiany spoiw szklanych na szklanokrystaliczne [35]. Aby zbudować modele związków przyczynowo-skutkowych, uzasadnione jest więc rozdzielenie problemu badawczego i poszukiwanie zależności korelacyjnych dla trzech grup:

1. ściernice o konwencjonalnej budowie (ścierniwo i spoiwo wytwarzane przemysłowo),
2. ściernice o modyfikowanym ścierniwie,
3. ściernice o modyfikowanym spoiwie

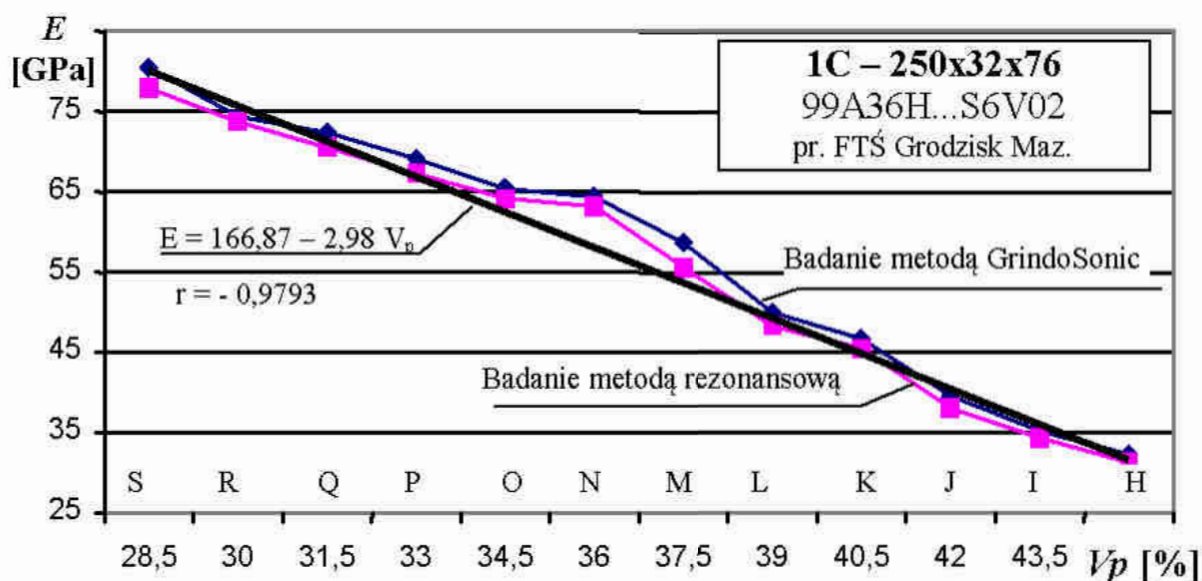
Ilościowe ujmowanie wpływu tych rodzajowych elementów budowy wewnętrznej ściernicy na przyjęty wskaźnik jakości (moduł E) stwarza możliwość śledzenia jego zmian, a tym samym umożliwia wybór optymalnego wariantu konstrukcyjnego.

3.2. Badanie modułu E ściernic o konwencjonalnej budowie

W zakresie ściernic z konwencjonalnych materiałów i recepturowaniu zgodnym z PN 71-59101 (tab. I) badania przeprowadzono dwutorowo:

1. na ściernicach tarczowych o celowo programowanej charakterystyce (38 realizacji, 4–6 powtórzeń każda), wytwarzanych w sposób przemysłowy w Fabryce Tarcz Ściernych w Grodzisku Maz, które badano dwiema metodami akustycznymi opartymi na pomiarze częstotliwości drgań własnych: rezonansową oraz (porównawczo) GrindoSonic [120].
2. na ściernicach tarczowych o różnej charakterystyce (267 realizacji), wytwarzanych pod zamówienia różnych użytkowników w FMiWŚ „Korund” w Kole. Badano je metodą SonicComparator (akustyczną niskiej częstotliwości), stosowaną przez tego producenta, w procesie produkcyjnym, do badań jakości wytwarzanych narzędzi.

Zależność pomiędzy modułem E a twardością ściernic z elektrokorundu szlachetnego (99A), wytwarzanych na standardowym spoiwie V02 w FTŚ. Grodzisk Maz., pokazano na rys. 69.



Rys. 69. Zależność modułu E od udziału objętościowego poru V_p

Fig. 69. Dependence of the modulus E on the pore volume fraction V_p

Z przedstawionych danych wynika, że istnieje bardzo silny związek korelacyjny pomiędzy twardością ściernic według skali Nortona, a wartością modułu E tych narzędzi. Jeżeli przyjąć, że twardości według tej skali, odpowiada określony udział objętościowy poru V_p (zgodnie z PN-71-58101), to można wyznaczyć równanie regresji $E = (V_p)$. Dla ściernic badanych metodą rezonansową, równanie to ma postać:

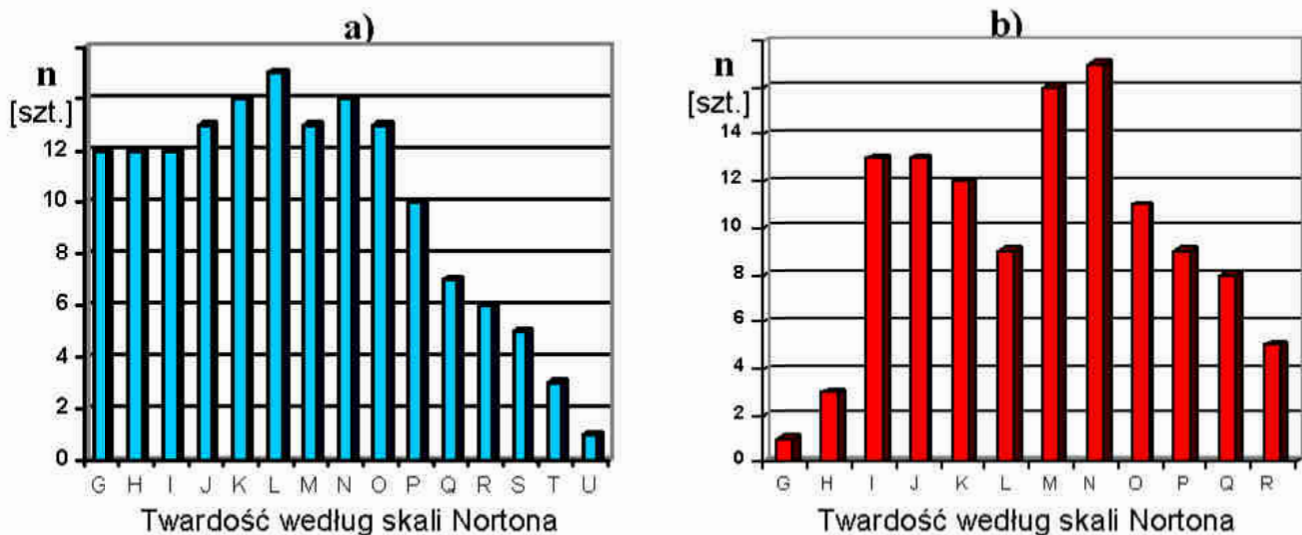
$$E = 166,87 - 2,98 V_p \quad (59)$$

Z badań metodą GrindoSonic tych ściernic równanie regresji ma postać:

$$E = 166,45 - 2,97 V_p \quad (60)$$

Weryfikując otrzymane równania testem t Studenta stwierdzono, że różnice we współczynnikach regresji są statystycznie nieistotne przy poziomie istotności $\alpha = 0,01$. Pozwala to na postawienie wniosku, że wyniki pomiarów dokonywanych metodą rezonansową są właściwe i mogą być wykorzystywane (jako dane) do prowadzonych analiz.

Sprawdzenia postaci otrzymanego równania regresji dokonano na szerokiej gamie ściernic ceramicznych o różnej charakterystyce, wytwarzanych przemysłowo w FMiWŚ „Korund” w Kole. Rozkłady twardości badanych ściernic przedstawiono na rys. 70.



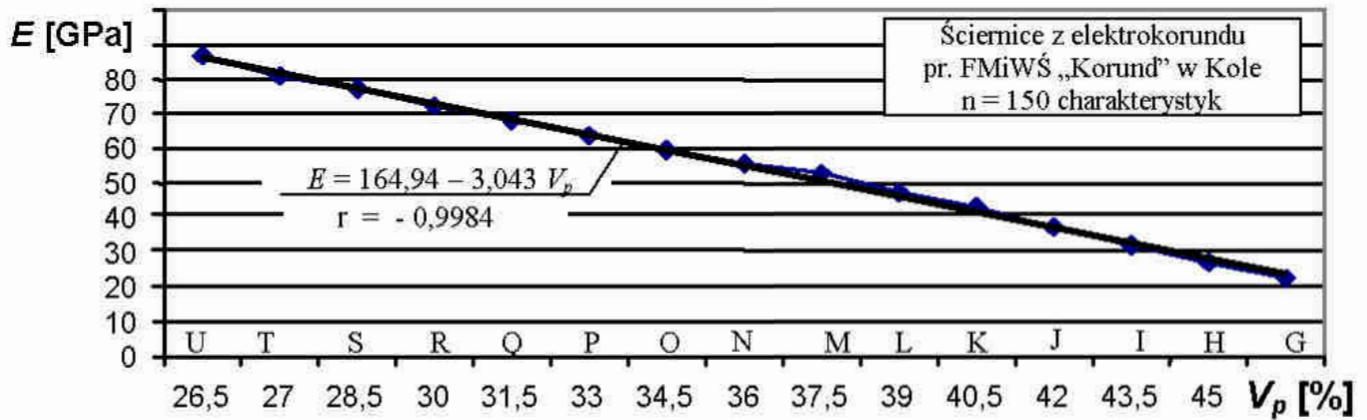
Rys. 70. Rozkład charakterystyk ściernic badanych w warunkach przemysłowych: ścierniwo: a) z elektrokorundu, (n= 150szt.), b) z węgliku krzemu (n = 117 szt.)

Fig. 70. Characteristics distribution of grinding wheels tested under industrial conditions: abrasive material composed of a) alundum, (n= 150 pcs), b) silicon carbide (n= 117 pcs)

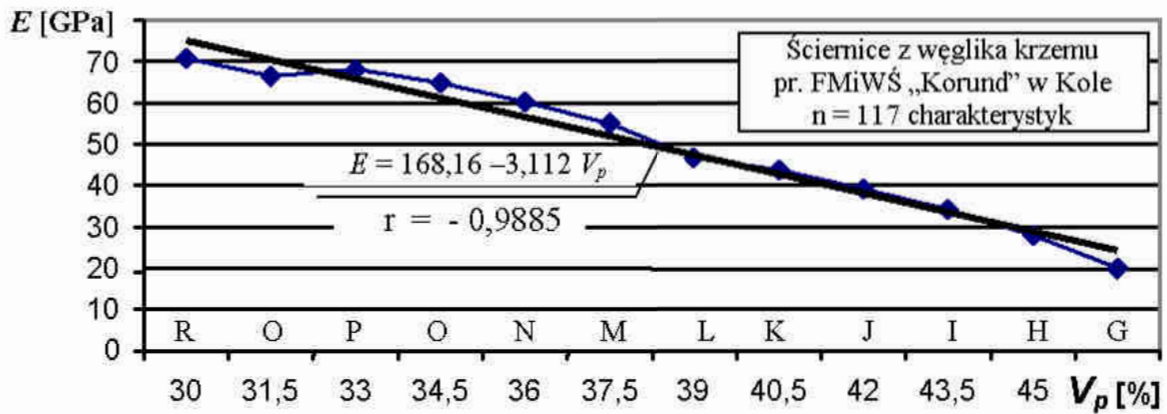
Zbadano łącznie 150 charakterystyk ściernic z elektrokorundu (rys. 70a), wykonanych z tego samego typu spoiwa ceramicznego, oznaczonego przez producenta jako VBEB5 (pozostałe parametry charakterystyki były zmienne, w zależności od zapotrzebowania odbiorców).

Spośród ściernic z węgliku krzemu badaniom poddano łącznie 117 charakterystyk, przy czym były to narzędzia o różnych charakterystykach i produkowane z czterech różnych spoiw (VK-X14, V-X5, X6, X8H).

Graficzny obraz uzyskanej funkcji $E=f(V_p)$ dla ściernic elektrokorundowych pokazano na rys. 71, a dla ściernic z węgliku krzemu na rys. 72.



Rys. 71. Zależność modułu E od twardości ściernic ceramicznych z elektrokorundu
Fig. 71. Dependence of the modulus E on the hardness of ceramic grinding wheels made of alundum



Rys. 72. Zależność modułu E od twardości ściernic ceramicznych z węgla krzemu
Fig. 72. Dependence of the modulus E on the hardness of ceramic grinding wheels made silicon carbide

Stwierdzono, że przeciętna wartość modułu E ściernic wytwarzanych w warunkach przemysłowych jest bardzo mocno skorelowana z udziałem objętościowym por V_p badanych ściernic, przy czym większa zgodność występuje dla ściernic z elektrokorundu niż dla ściernic z węgla krzemu.

Prostą regresji liniowej dla ściernic z elektrokorundu opisuje równanie:

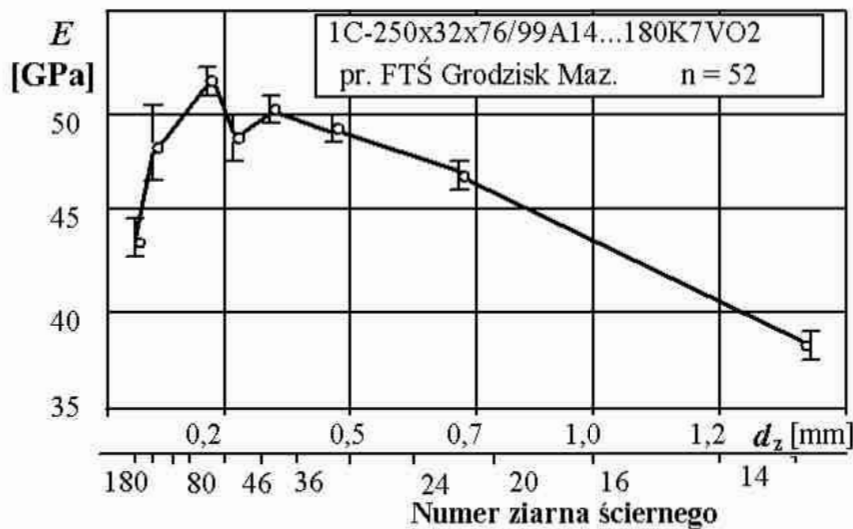
$$E = 164,94 - 3,043 V_p \quad (61)$$

W przypadku ściernic z węgla krzemu równanie to ma postać:

$$E = 168,16 - 3,112 V_p \quad (62)$$

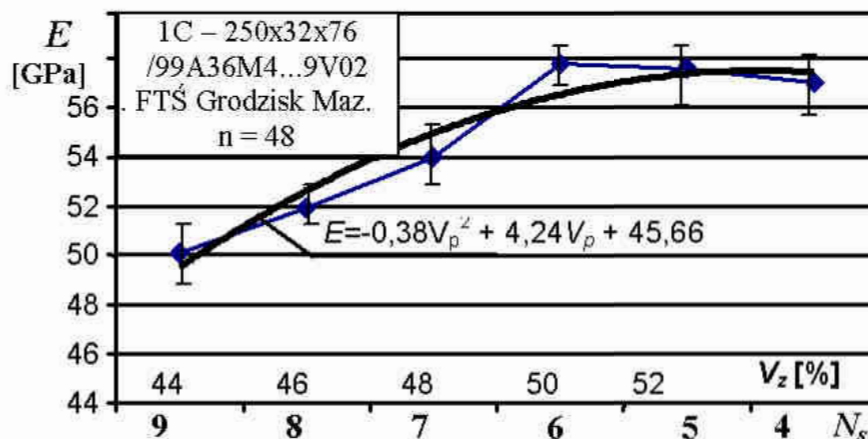
Weryfikując otrzymane wyniki testem t Studenta stwierdzono, że różnice we współczynnikach regresji między tymi równaniami są statystycznie istotne (na poziomie istotności $\alpha = 0,01$). Przy $\alpha = 0,05$ są one także istotne w stosunku do ściernic produkowanych w FTŚ Grodzisk Maz. (równania 59 i 60).

Wartość modułu E ściernic zależy nie tylko od rodzaju materiału ściernego i udziału objętościowego por V_p , ale także od wielkości ziaren ściernych (rys. 73) oraz ich udziału objętościowego V_z , opisującego strukturę ściernicy (rys. 74).



Rys. 73. Zależność modułu E od numeru ziarna ściernego

Fig. 73. Dependence of the modulus E on the abrasive grain size number



Rys. 74. Zależność modułu E od numeru struktury ściernicy

Fig. 74. Dependence of the modulus E on the grinding wheel structure number

Z otrzymanych danych wynika, że zależność modułu E od wielkości ziarna ściernego oraz jego udziału objętościowego w ściernicy ma charakter niemonotoniczny. Przy drobnych ziarnach trend jest rosnący, a przy grubszych malejący. Można to wyjaśnić zmianą udziału objętościowego spoiwa przypadającą na poszczególne ziarno ściernic [120]. Większy udział ziaren w kompozycji powoduje także wzrost modułu E , przy czym zależność ta słabnie przy bardziej zwartej strukturze ściernicy. Ogólnie biorąc, ziarna ściernic tworzą fazę o większej sztywności i ich udział w ściernicy sprzyja wzrostowi modułu E , a tym samym mniejszej jej elastyczności.

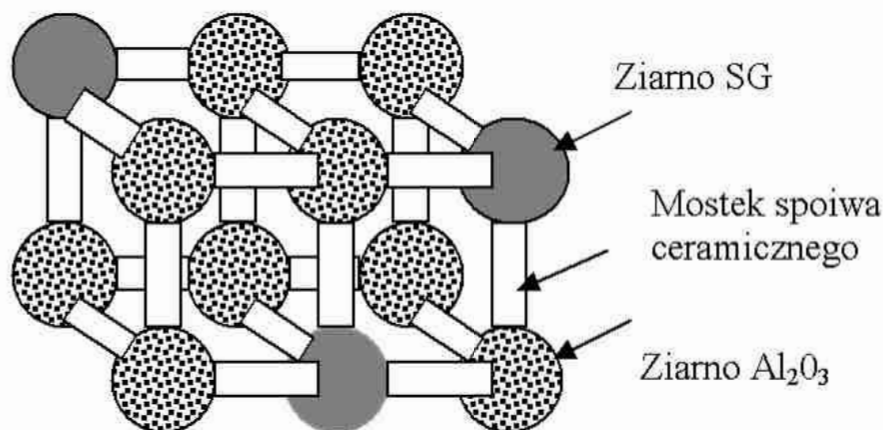
3.3. Badanie modułu E ściernic z modyfikowanego ścierniwa

Z dotychczasowych rozważań wynika, że każdy układ strukturalny ściernicy charakteryzuje się określoną sztywnością, opisywaną wartością modułu E . Dwa czynniki mają szczególnie istotny wpływ na tę cechę materiałową:

- siła wiązania ziaren mostkami spoiwa – zależna od rodzaju stykających się materiałów,
- upakowanie ziaren – wynikające z doboru ich wielkości, twardości i struktury ściernicy.

Zmieniając rodzaj materiału ściernego lub spoiwa można więc wpływać na własności sprężyste ściernic. W ostatnim okresie do bardzo perspektywicznych innowacji w budowie konwencjonalnych narzędzi ściernych zalicza się wprowadzenie mikrokrystalicznego korundu spiekane (SG) jako ścierniwa [97] i spoiwa szklanokrystalicznego [38]. Ponieważ zastosowanie takich modyfikowanych ścierniwi i spoiw zmienić może charakter wiązań materiałowych (co w konsekwencji może wpłynąć na sztywność wytworzonego kompozytu) przeprowadzono badania wpływu tych czynników na moduł E .

Ceramiczny tlenek glinu SG (Seeded Gel) stanowi najnowszą generację korundów spiekanych. Został wyprodukowany przez firmę Norton pod koniec lat 80. Ma właściwości technologiczne znacznie przewyższające powszechnie stosowane gatunki elektrokorundu [97]. W praktyce z mikrokrystalicznego korundu spiekane typu SG wytwarza się narzędzia ściernie zawierające od 10 do 50% czystego korundu spiekane. Pozostałą część materiału ściernego stanowi elektrokorund Al_2O_3 , zwykle tej samej granulacji co zastosowany SG [72]. Ściernice ceramiczne o zmodyfikowanym ścierniwie są więc kompozytami składającymi się z trzech składników materiałowych: ziarna Al_2O_3 , ziarna SG oraz mostków wiążących spoiwa o właściwościach szkła – rys. 75.



Rys. 75. Model ściernicy ceramicznej o zmodyfikowanym ścierniwie

Fig. 75. Model of a grinding wheel with modified abrasive material

Biorąc pod uwagę uzyskiwane wydajności szlifowania ścierniwo SG klasyfikuje się go jako materiał pośredni pomiędzy elektrokorundem szlachetnym a regularnym azotkiem boru [36]. Ziarna SG otrzymuje się w wyniku spiekania submikroproszku Al_2O_3 o wymiarze cząstek 0,1–5 μm metodą zol-żel [78]. W toku produkcji czysty Al_2O_3 łączy się w wodzie ze środkiem modyfikującym, np. azotanem magnezu, tworząc zbrylony żel, który po odwodnieniu poddaje się kolejno rozdrobnieniu, klasyfikacji i wypalaniu w temperaturze 1300-1400 $^{\circ}C$ [78]. Dzięki mikrokryształicznej oraz izotropowej budowie ziarna SG charakteryzują się doskonałymi zdolnościami do samoostrzenia zachodzącego w mikroskali. Sprzyja to lepszej zdolności skrawnej tych narzędzi [139]. W porównaniu do narzędzi z CBN są one zdecydowanie tańsze i wymagania stawiane szlifierkom mniej wygórowane [8].

Zbadano, że wprowadzenie mikrokryształicznego korundu spiekanego typu SG w części lub nawet w całości do ścierniwa z Al_2O_3 , nie pogarsza własności wytrzymałościowych ściernic ceramicznych wykonanych z takiej mieszanki [142]. Można więc oczekiwać coraz szerszego rozprzestrzeniania się narzędzi ściernych z tego typu ścierniw.

Biorąc pod uwagę możliwe interakcje pomiędzy składnikami recepturalnymi ściernic z ziarnem SG, badania przeprowadzono z użyciem planowania eksperymentu przy 4 zmiennych [138]:

- A – numer ziarna ściernego N_z (60,80 100),
- B – procentowa zawartość SG w masie ścierniej ($V_{sg} = 10,30,50,100\%$),
- C – twardość J, K, L, M, N (określona procentowym udziałem por V_p),
- D – struktura 5, 6, 7, 8, 9 (określona procentowym udziałem ziaren V_z).

W typowej działalności przemysłowej do budowy ściernic ceramicznych praktycznie wykorzystuje się struktury: 5–9 i twardości: J–N. Dlatego też tego zakresu dotyczył przyjęty obszar badań.

Zaplanowano eksperyment typu: „plan pięciopoziomowy, kompozycyjny, rotatabilny, (wpisany)” (*central composite inscribed design*). Do planowania i opracowania wyników wykorzystano program komputerowy Experiment Planner 1.0 [73]. Plan doświadczeń umożliwiał wyznaczenie modelu statystycznego kwadratowo-liniowego (równania powierzchni odpowiedzi) o postaci:

$$y = b_0 + b_1A + b_2B + b_3C + b_4D + b_{12}AB + b_{13}AC + b_{14}AD + b_{23}BC + b_{34}CD + b_{123}ACD + b_{124}ACD + b_{234}BCD + b_{1234}ABCD + b_{11}A^2 + b_{22}B^2 + b_{33}C^2 + b_{44}D^2 \quad (63)$$

gdzie: A, B, C, D – czynniki wejściowe.

Test przeprowadzono na ściernicach małogabarytowych o wymiarach: 35 x 20 x 10 (przy 12 powtórzeniach dla określonej charakterystyki). Narzędzia te zostały wykonane według standardowych receptur, stosowanych w firmie INTER-DIAMENT w Grodzisku Maz. Zastosowane spoiwo VO4/D (typu amorficznego o gęstości $\rho = 2,41 \text{ g/cm}^3$ i stratach prażenia 4%) mieszano z odpowiednimi mieszankami ziarna SG oraz elektrokorundu Al_2O_3 . Materiałem ściernym SG był produkt firmy NORTON typ XTL-B560 (niebieski), przeznaczony do ściernic konwencjonalnych ogólnego przeznaczenia, twardości (wg metody Vickersa) 21,6 GPa, gęstości $3,91 \text{ g/cm}^3$ i składzie chemicznym (%): $\text{Al}_2\text{O}_3 - 99,6$; $\text{TiO}_2 - 2,0$; $\text{SiO}_2 - 0,70$; $\text{Na}_2\text{O} - 0,10$; $\text{CaO} 0,10$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,20$; $\text{Mg} - 0,15$. Wszystkie ściernice wypalano w typowych warunkach produkcji ściernic ceramicznych, stosowanych u danego producenta.

Charakterystykę badanych ściernic oraz wielkości statystyczne modułu E , uzyskane z pomiarów przyrządem ZWUK 107, zestawiono w tabelicy III [138].

Tab. III. Wielkości statystyczne modułu E z badań ściernic o ścierniwie SG

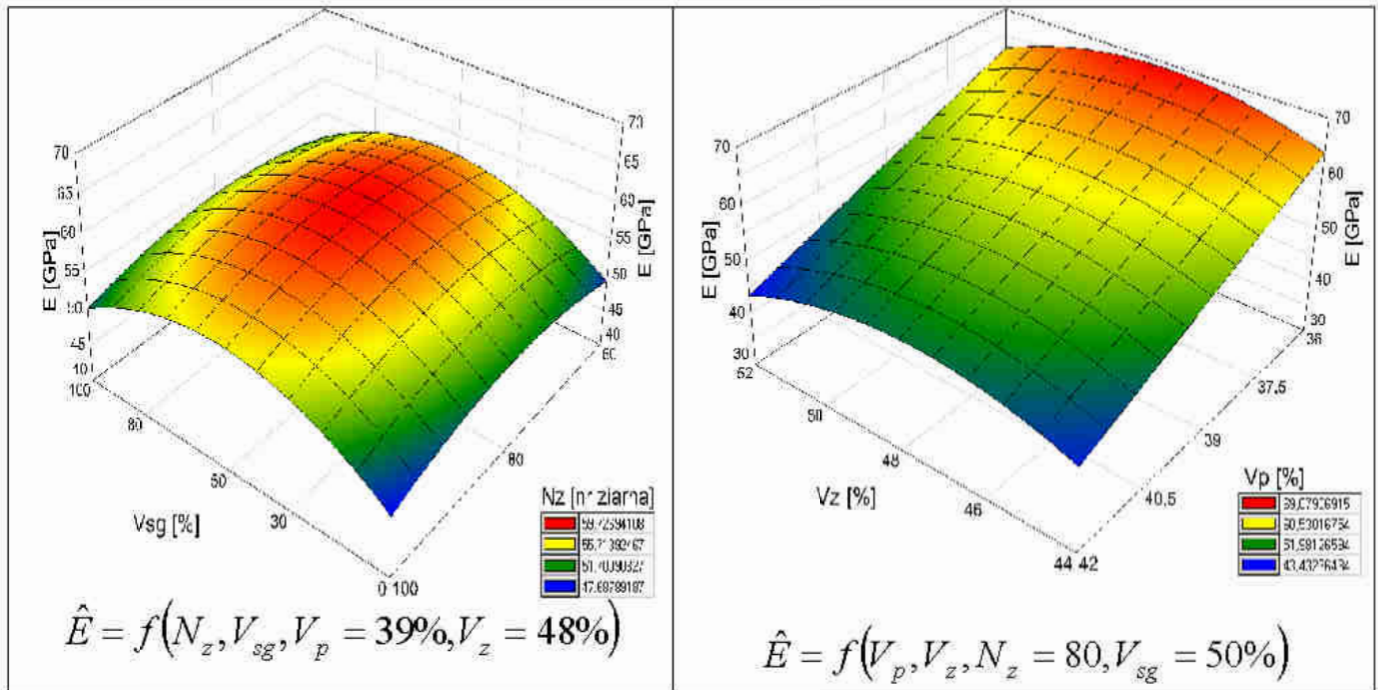
Tab. III. Statistic quantities of the modulus E from investigations on the grinding wheels with SG abrasive

Lp.	Ściernica	\bar{E} [GPa]	σ_{n-1} [GPa]	Lp.	Ściernica	\bar{E} [GPa]	σ_{n-1} [GPa]
1	3SG 60 M8	60,69	0,64	14	3SG 100 K6	50,00	0,77
2	3SG 100 M8	56,3	0,92	15	8SG 60 K6	49,36	0,97
3	8SG 60 M8	61,07	0,72	16	8SG 100 K6	49,44	0,26
4	8SG 100 M8	56,09	0,67	17	5SG 100 L7	55,38	1,04
5	3SG 60 K8	50,32	0,89	18	5SG 60 L7	51,65	0,75
6	3SG 100 K8	47,32	0,70	19	10SG 80 L7	51,81	2,58
7	8SG 60 K8	51,57	0,86	20	99A 80 L7	51,54	0,95
8	8SG 100 K8	48,16	1,20	21	5SG 80 J7	46,00	0,72
9	3SG 60 M6	57,09	0,65	22	5SG 80 N7	69,02	0,72
10	3SG 100 M6	57,64	0,86	23	5SG 80 L5	51,4	1,51
11	8SG 60 M6	57,54	0,92	24	5SG 80 L9	54,34	0,92
12	8SG 100 M6	56,78	0,84	25	5SG 80 L7	60,74	1,32
13	3SG 60 K6	50,04	0,81	26	5SG 80 L7	60,74	1,32

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono postać modelu statystycznego, zawierającego wszystkie istotne współczynniki równania przy założonym poziomie istotności ($\alpha = 0,05$). Postać tę wyraża równanie regresji:

$$\hat{E} = -635,07 + 0,022 \cdot N_z + 0,305 \cdot V_{sg} - 3,14 \cdot V_p + 33,92 \cdot V_z + \\ + 0,026 \cdot N_z \cdot V_z - 0,008 \cdot N_z^2 - 0,003 \cdot V_{sg}^2 - 0,376 \cdot V_z^2 \quad (64)$$

Korzystając z wyprowadzonego równania, opracowano graficzny obraz interakcyjnego (systemowego) oddziaływania badanych parametrów budowy ściernicy z mikrokryształicznego korundu spiekane go typu SG na średnią wartość modułu E . Zależność tę przedstawiono na rys. 76.



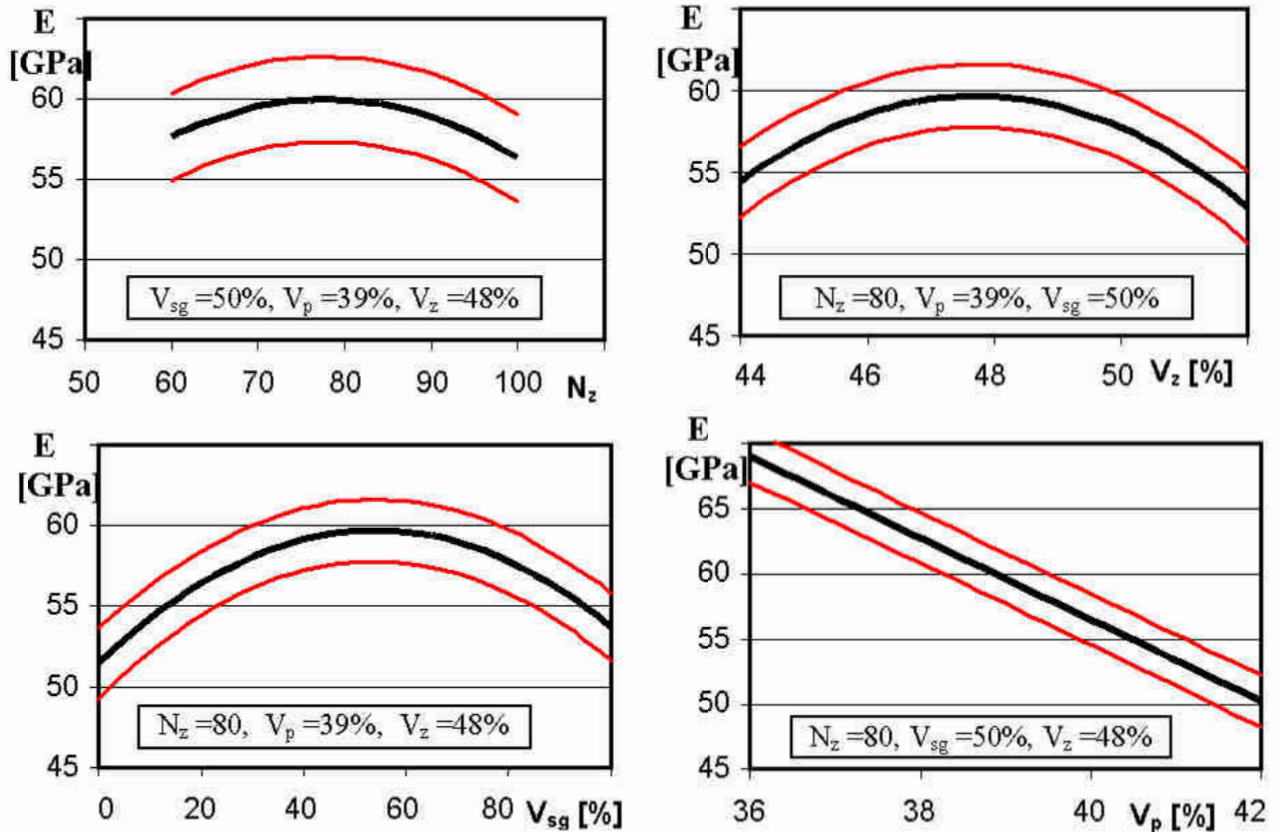
Rys. 76. Interakcyjny wpływ parametrów budowy ściernicy z SG na moduł E

Fig. 76. Interactive effect of SG grinding wheel structure parameters on the modulus E

Otrzymane dane wskazują, że własności sprężyste (opisywane wartością modułu E) zależą w sposób znaczący od wszystkich badanych parametrów budowy ściernicy ze zmodyfikowanego ścierniwa, takich jak: twardość, struktura, wielkość ziarna oraz udział procentowy ziaren SG w materiale ściernym. Jednoznaczny trend istnieje tylko dla zależności $E = f(V_p)$. Charakter tej zależności jest odwrotnie proporcjonalny. Proporcjonalne zmniejszanie udziału objętościowego por V_p w ściernicy, wywołane zmianą jej twardości, objawia się proporcjonalnym wzrostem modułu E . Wynika to ze wzrostu udziału objętościowego spoiwa, który usztywnia cały kompozyt.

Wpływ pozostałych badanych parametrów budowy ściernicy ze zmodyfikowanego ścierniwa na moduł E jest niejednoznaczny. W przyjętym zakresie zmienności: numeru ziarna N_s , jego udziału objętościowego V_z oraz procentowej domieszki ziaren SG w ścierniwie obserwuje się bowiem rosnąco malejący trend jego wartości. Taki charakter zależności wskazuje na nakładanie się oddziaływań dwóch różnych czynników: jednego – powodującego wzrost sztywności danego kompozytu i drugiego – osłabiającego tę sztywność.

Przyczyną pierwszego jest wzrastając udział ziaren jako sztywnych węzłów kompozytu, a przyczyną drugiego jest zmniejszający się udział jednostkowy spoiwa łączącego te ziarna. W efekcie interakcyjnego oddziaływania tych dwóch trendów występuje układ parametrów dający maksymalizację wartości modułu E . Wystąpienie takiej maksymalnej wartości punktu, dla określonego układu parametrów, można wyraźnie zaobserwować na rys. 77.



Rys. 77. Zależność modułu E od parametrów budowy ściernic z ziarnem SG

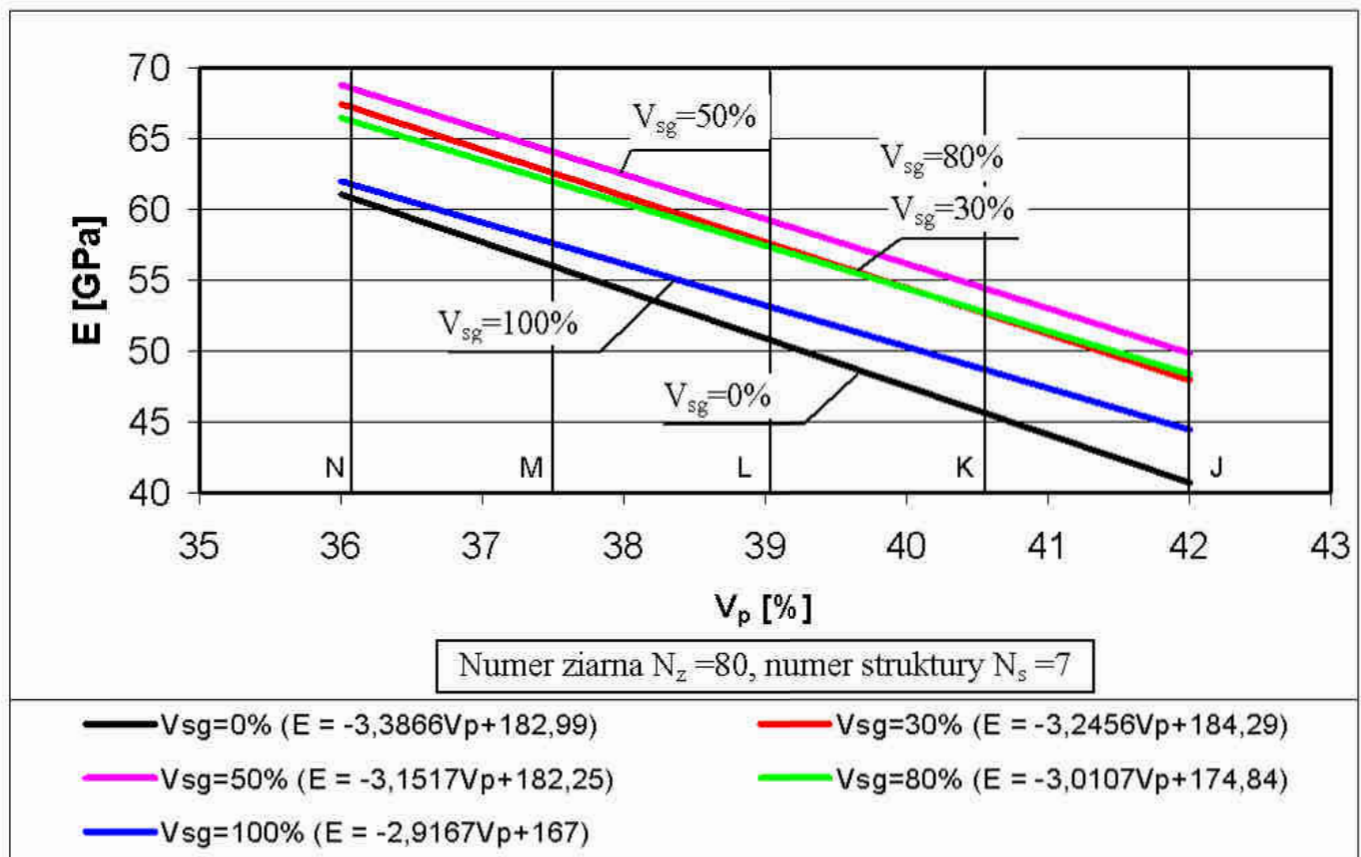
Fig. 77. Dependence of the modulus E on SG grinding wheel structure parameters

Domieszkowanie ścierniwa z tlenku glinu Al_2O_3 niewielką ilością ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekanego SG (do 50%) sprzyja wzrostowi modułu E (wprowadzenie do mieszanki np. 20% ziaren SG objawia się zmianą odpowiadającą zwiększeniu twardości o 1 klasę według skali Nortona), wzrost udziału SG ponad tę wartość, powoduje jednak sukcesywne zmniejszanie tego parametru. Taki charakter przebiegu funkcji $E = (V_{sg})$ można tłumaczyć tym, że ziarna z SG charakteryzują się większą sztywnością niż polikrystaliczny Al_2O_3 i ich większy udział w ścierniwie zwiększa sztywność całego kompozytu.

Ponieważ jednak ziarna te są materiałem spiekanym (jednorodnym i kształtnym), to słabsza jest penetracja spoiwa w ziarno w strefie przejściowej podczas procesu wypalania, a wykazano, że strefa ta ma szczególne znaczenie dla własności ceramicznych narzędzi ściernych z tlenku glinu [38]. Im więcej w ścierniwie tego

typu ziaren, tym słabsze ich powiązanie spoiwem. W konsekwencji następuje zmiana trendu z rosnącego na malejący przy 50% udziale ziarna SG w ścierniwie.

Analizując wpływ udziału procentowego ziaren korundu spiekane SG na własności sprężyste ściernic, wytworzonych z takiego modyfikowanego ścierniwa, uzasadniony jest wniosek, że najkorzystniej jest stosować mieszanki o zawartości SG nie przekraczającej 50% składu. Zależność ta jest adekwatna dla wszystkich badanych twardości – rys. 78.



Rys. 78. Proste regresji funkcji $E = f(V_p)$ przy różnym udziale SG w ścierniwie

Fig. 78. Regression lines of the function $E = f(V_p)$ at different SG concentration in abrasive material

Pokazane przebiegi funkcji $E = f(V_p)$, dla określonych zawartości ziaren SG w ścierniwie, opisać można równaniami regresji liniowej podanymi na rys. 78. Równania te mogą być wykorzystywane do ustalenia wzorcowych wartości tego parametru dla ściernic ceramicznych o modyfikowanym ścierniwie.

W partiach rzeczywistych narzędzi występuje rozrzut wyników (opisany wartością odchylenia standardowego σ_{n-1}). Z analizy wartości tego parametru (tab. III) wynika, że jego wartość dla badanych ściernic mieści się w zakresie: 0,26–2,58 GPa (przy przeciętnej wartości 0,94 GPa). Z wyliczenia współczynnika zmienności v wynika, że dla każdej charakterystyki jest on mniejszy niż 0,33. Oznacza to, że rozkład zmienności może być opisany rozkładem normalnym, co świadczy o tym,

że występujący rozrzut jest wynikiem błędów przypadkowych, a nie oddziaływania systemowego. Biorąc to po uwagę oraz wyliczoną przeciętną wartość rozrzutu σ_{n-1} , można przyjąć, że przy 95% poziomie ufności konkretna wartość modułu E (w określonej partii narzędzi danego producenta) może się zmieniać w stosunku do wartości wyliczonej według równania (64), nie więcej niż o ± 2 GPa.

3.4. Badanie modułu E ściernic z modyfikowanego spoiwa

Podczas szlifowania w pracującym narzędziu ściernym, zarówno w ziarnach ściernych, jak i łączących je mostkach spoiwa zachodzi szereg zjawisk elementarnych, wpływających na intensywność zużycia tych narzędzi [8]. Na skutek obciążeń mechanicznych w mostkach spoiwa rozwijają się mikropęknięcia powierzchniowe, typu Griffitha, zmniejszające ich wytrzymałość. Ponadto, ciepło powstające w strefie skrawania wywołuje szoki termiczne, będące przyczyną i zarodkiem rys oraz pęknięć, które (w przypadku spoiw szklanych) mogą się rozchodzić bardzo gwałtownie na dużą skalę. Powoduje to inicjację międzyziarnowego lub międzykrystalicznego mikropęknięcia, będącego przyczyną dekohezji mostka wiążącego [60].

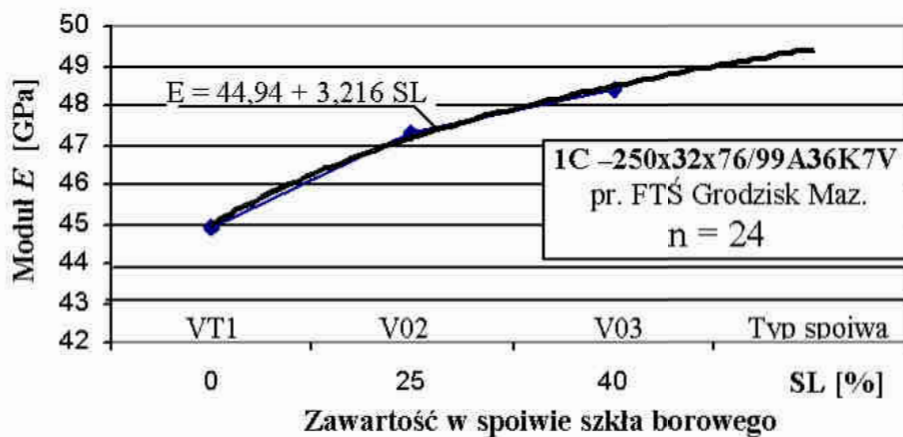
Wykazano, że dla zminimalizowania tego problemu, a tym samym polepszenia właściwości eksploatacyjnych narzędzi ściernych, celowe jest stosowanie modyfikowanych spoiw ceramicznych o budowie szklanokrystalicznej [37]. Rodzaj fazy krystalicznej i wielkość kryształów można regulować dość precyzyjnie, zmieniając skład chemiczny szkła wejściowego i warunki krystalizacji [35]. Przeprowadzono zatem badania wpływu oddziaływania tych czynników na własności sprężyste (opisywane modułem E) ściernic wykonanych z tego typu spoiw. Są one treścią niniejszego podrozdziału. Dla porównania, zbadano także charakter i wielkość zmian tego parametru przy możliwych modyfikacjach spoiw amorficznych (szklanych), stosowanych w warunkach przemysłowych w FTŚ Grodzisk Maz. Producent ten swoje spoiwa oznacza symbolami: VT1, V02, V03. Są to spoiwa półfrytowe, zawierające w swym składzie część surowca plastycznego i część szkła.

Spoiwo VT1 jest przeznaczone głównie do mas ściernych z elektrokorundu, wykorzystywanych do wytwarzania ściernic ogólnego przeznaczenia. Charakteryzuje się wysoką ogniotrwałością (zwykle $1260 \div 1280^\circ\text{C}$) oraz niską wytrzymałością na rozzerwanie ($R_m = 5\text{--}6$ MPa). Jest to spoiwo skaleniowo-glinowe, ponieważ jego podstawowe składniki surowcowe to: skaień strzeblowski (72%), glina Żarnów (14%), glina Kraniec (5%) oraz kaolin szlamowy (9%).

Spoiwo V02 to spoiwo o podwyższonej wytrzymałości na rozrywanie ($R_m = 10\text{--}15$ MPa) i temperaturze topnienia $1040\text{--}1060^\circ\text{C}$. Spoiwo to przeznaczone jest głównie do ściernic małogabarytowych z elektrokorundu: 99A, 95A i CrA oraz ściernic wymagających utrzymania profilu. Jego skład surowcowy to: skaień strzeblowski (50%), glina Żarnów (15%), glina Baranów Biały (15%), talk (5%) oraz szkło borowe SI-54 w ilości 25%.

Spoiwo V03 jest przeznaczone natomiast do ściernic specjalnych (bardzo reaktywne w stosunku do ziarna z tlenku glinu). Charakteryzuje się wysoką wytrzymałością na rozrywanie ($R_m = 14\text{--}16$ MPa) i niską temperaturą topnienia ($860\text{--}880^\circ\text{C}$). Składa się ze szkła borowego (40%), okiennego (40%) oraz gliny Żarnów (20%).

Przeciętne wartości modułu E ściernic o jednakowej charakterystyce, 1C-250x32x76/99A36K7V wykonanych z tych odmian spoiwa ceramicznego, używanego do produkcji przemysłowej ściernic w Fabryce Tarcz Ściernych w Grodzisku Maz., pokazano na rys. 79.



Rys. 79. Zależność modułu E od udziału w spoiwie szklanym szkła borowego
Fig. 79. Dependence of the modulus E on boron glass in glass binder

Czynnikiem wyróżniającym te spoiwa jest udział szkła borowego. Z rys. 79 wynika, że wzrost udziału tego składnika w spoiwie szklanym odbija się zwiększoną sztywnością ściernic, czego obrazem jest większa wartość modułu E . Bor oddziałuje na zmianę kwasowości spoiwa, przez co zmienia jego energię powierzchniową. Spoiwo o większej energii powierzchniowej charakteryzuje się większą zdolnością do przeciwstawiania się rozwojowi mikropęknięć typu Griffitha, co w konsekwencji prowadzi do mniejszej intensywności wykruszeń ziaren ściernych [120]. Dlatego też dany producent stosuje spoiwo odmiany V03 (o dużej zawartości szkła borowego) do wykonywania ściernic specjalnych, wymagających długiego utrzymywania swego profilu, np. przy szlifowaniu kształtowym.

Zahamowanie rozwoju mikropęknięć typu Griffitha można też uzyskać przez zastosowanie spoiw szklanokrystalicznych [38]. Badania tego typu spoiw (odmiany X) przeprowadzono dla receptur i warunków wytwarzania podanych w pracy [35]. W Laboratorium Katedry Inżynierii Materiałowej Politechniki Koszalińskiej ze spoiw tych wykonano ściernice o charakterystyce: 1C-25x10x10/99A80K...S7V(X). Dla danego spoiwa liczność próbki wynosiła 25 sztuk. Dane dotyczące badanych spoiw według [35] zestawiono w tab. IV.

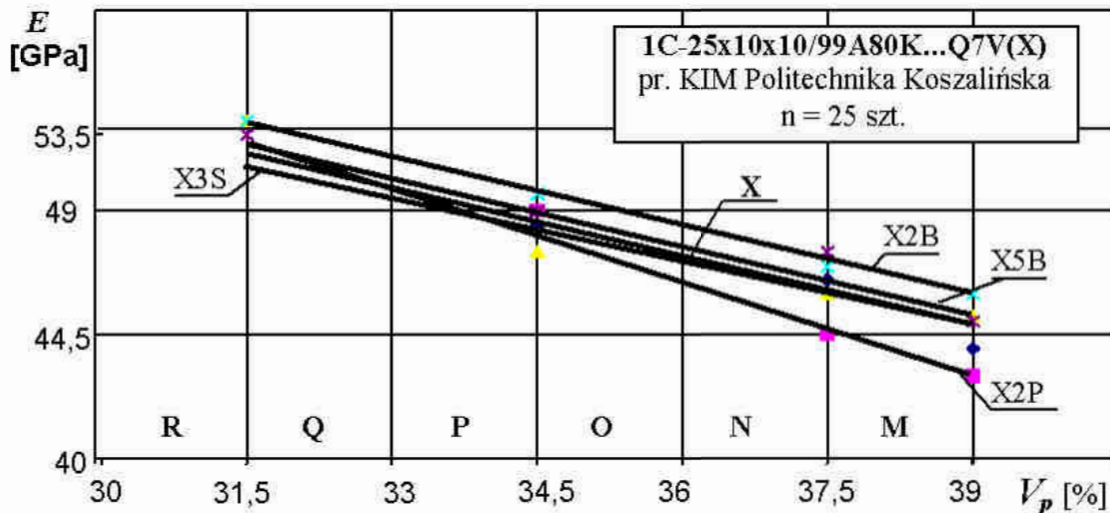
Tab. IV. Charakterystyka badanych spoiw szklanokrystalicznych**Tab. IV.** Characteristics of investigated glass-crystalline binders

Symbol spoiwa	Skład surowcowy	Podstawowe fazy krystaliczne	Temp. spiekania	Wytrż. na rozerw. R_m [MPa]	Mikrotw. H_v [kg/mm ²]	Gęstość P [g/cm ³]
X	Żużel pomiedziowy (HM Głogów)	Ca ₂ (Al,Mg,Si)Si ₂ O ₇ (melilit) CaO MgSiO ₂ (diopsyd) CaOMgSiO ₂ (monticellit)	1280 ⁰ C	9,8÷10,1	770	2,86
X2P	Żużel + kaolin	Ca ₂ (Al,Mg,Si)Si ₂ O ₇ (melilit) CaOMgOSiO ₂ (monticellit) Ca ₂ Al ₂ Si ₂ O ₈ (anortyt)	1220 ⁰ C	10,2÷11,0	720	2,70
X3S	Żużel + kaolin + szkło	CaOMgSiO ₂ (monticellit) CaAl ₂ Si ₂ O ₈ (anortyt)	1180 ⁰ C	11,2÷14,4	650	2,56
X2B	Żużel + szkło	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ (anortyt) CaOMgO ₂ SiO ₂ (diopsyd) Mg(Al,Fe) ₂ O ₁ (spinel)	1200 ⁰ C	12,4÷15,4	740	2,68
X5B	Żużel + szkło	CaOMgO ₂ SiO ₂ (diopsyd)	1100 ⁰ C	14,0÷18,7	700	2,58
S	szkło	-	1120 ⁰ C	10÷12,2	620	2,50

Za pomocą metody akustycznej średniej częstotliwości, zbadano moduł E tych ściernic. Postać równania linowego, opisującego funkcję $E = f(V_p)$ dla danej odmiany spoiwa szklanokrystalicznego, zestawiono w tabelicy V, a ich graficzne obrazy pokazano na rys. 80.

Tab. V. Wyniki badań modułu E ściernic ze spoiwa szklanokrystalicznego**Tab. V.** Results of investigations on the modulus E of grinding wheels with glass-crystalline binder

Lp.	Odmiana spoiwa	Równanie linii trendu (przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$)	Współczynnik korelacji r	ΔE [GPa] dla jednej klasy twardości
1	X	$E = 90,51 - 1,080 V_p$	0,8114	4,19
2	X2P	$E = 95,71 - 1,357 V_p$	0,9231	4,50
3	X3S	$E = 81,57 - 0,952 V_p$	0,9959	3,38
4	X2B	$E = 87,55 - 1,077 V_p$	0,9801	3,96
5	X5B	$E = 85,41 - 1,035 V_p$	0,9805	3,84



Rys. 80. Linie trendu funkcji $E = F(V_p)$ dla badanych spoiw szklanokrystalicznych
Fig. 80. Trend lines of the function $E = f(V_p)$ for investigated glass-crystalline binders

Z przedstawionych zależności wynika, że ściernice wykonane ze spoiw $X2B$ i $X5B$ charakteryzują się wyższymi wartościami modułu E niż ściernice ze spoiwa o składzie podstawowym X . Wynika to z wyeliminowania ze składu faz krystalicznych monticellitu i melilitu. Minerale te charakteryzują się niższą wytrzymałością niż pirokseny jednoskośne, stanowiące podstawową fazę w postaci diopsydu w spoiwach oznaczonych jako: $X2B$ i $X5B$. Ten aspekt potwierdza się także w przypadku spoiw $X2P$ i $X3S$, które zawierają te składniki. Charakteryzują się one niższymi wartościami modułu E , ogólnie jednak występujące różnice pomiędzy badanymi odmianami spoiw przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ są statystycznie nieistotne.

W celu określenia różnic w zakresie modułu E , występujących pomiędzy spoiwami szklanokrystalicznymi a szklanymi, wykonano (w tych samych warunkach procesu wytwarzania) partię ściernic ze spoiwa szklanego (oznaczonego w tab. IV jako S). Z przeprowadzonych badań wynika, że funkcja $E = f(V_p)$ ściernic z tego spoiwa może być zapisana równaniem

$$E = 116,97 - 1,886V_p \quad (r = 0,9423) \quad (65)$$

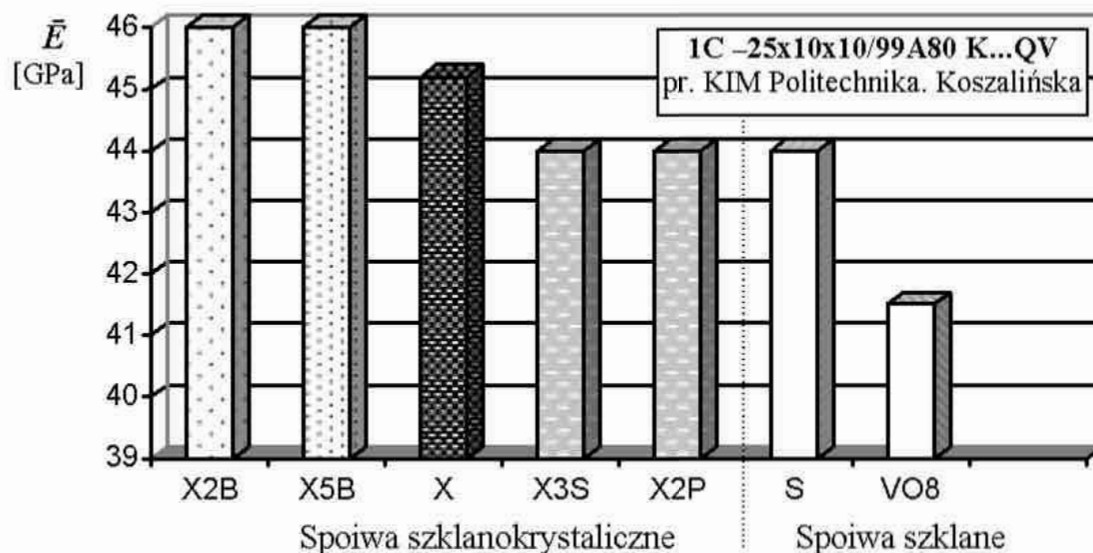
Występujące różnice przy $\alpha = 0,05$ są statystycznie nieistotne.

Wykonano także partię ściernic o tej samej charakterystyce na spoiwie szklanym VO8, stosowanym w warunkach przemysłowych. Dla ściernic o tej odmianie spoiwa szklanego funkcję $E = f(V_p)$ opisuje równanie:

$$E = 92,07 - 1,267V_p \quad (r = 0,9573) \quad (66)$$

Różnice w wartościach modułu E dla tego spoiwa oraz porównywanych spoiw szklanokrystalicznych są w tym przypadku statystycznie istotne przy $\alpha = 0,05$.

Porównawcze zestawienie wartości średnich modułu \bar{E} ściernic z badanych spoiw szklanych i szklanokrystalicznych pokazano na rys. 79.



Rys. 81. Wartości modułu E ściernic ze spoiw szklanych i szklanokrystalicznych

Fig. 81. The module E values for grinding wheels with glass and glass-ceramic binders

Z rysunku tego wynika, że ściernice wykonywane ze spoiw szklanokrystalicznych (zwłaszcza po wyeliminowaniu ze składu surowcowego minerałów z grupy ortokrzemianów i krzemianów) charakteryzują się na wyższych wartościach modułu E niż ściernice wykonywane ze spoiw amorficznych (szklanych). Przeciętnie różnice tego parametru odpowiadają podwyższeniu twardości ściernicy o 1–2 klasy według skali Nortona. Stosując spoiwa szklanokrystaliczne do wytwarzania narzędzi ściernych można zatem zwiększyć ich porowatość (obniżyć twardość), co w procesie szlifowania ma korzystny wpływ, zwłaszcza w zakresie obniżenia gradientu ciepła w strefie skrawania.

Uzyskane zależności dotyczące wpływu parametrów budowy ściernic ceramicznych na moduł E , przyjmowany jako wskaźnik systemowej oceny tych narzędzi, zostały wykorzystane do opracowania skali wzorców. Zagadnienie to jest treścią kolejnego podrozdziału.

3.5. Skala wartości normatywnych modułu E ściernic ceramicznych

Celem prowadzonych badań wpływu budowy ściernic ceramicznych na wartość modułu E jest wyznaczenie skali wzorców normatywnych, związanych z tym parametrem. Posiadanie takiej skali jest podstawą orzekania o jakości typu Qp zaprojektowanych narzędzi w świetle stanu przyjętego kryterium. Z dotychczasowych badań wynika, że moduł E ściernic ceramicznych jest czułym parametrem

trem na zmiany składników budowy. Zdecydowanie najsilniej i w sposób jednoznaczny zależy od udziału objętościowego porów V_p , określającego twardość tych narzędzi. Funkcja $E = f(V_p)$ jest odwrotnie proporcjonalna i może być opisywana liniowymi równaniami regresji. Z przeprowadzonej analizy statystycznej wynika, że z 95% poziomem ufności funkcja ta, dla przeciętnych wartości modułu \bar{E} narzędzi ściernych o spoiwie ceramicznym, może być opisana uogólnionym równaniem regresji liniowej o postaci:

$$\bar{E} = 165 - 3 V_p \quad [\text{GPa}] \quad (67)$$

gdzie: V_p – udział objętościowy porów dla danej klasy twardości, [%].

Zależność tę wykorzystano, jako podstawę, do budowy fizycznej skali twardości narzędzi ściernych o spoiwie ceramicznym, którą nazwano E -skala [56]. W skali tej przeciętne wartości modułu E tworzą określony ciąg wartości:

$$\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{E}_3, \dots, \bar{E}_k \quad (68)$$

przy czym:

$$\bar{E}_{k+1} = \bar{E}_k + \varphi_E \quad (69)$$

gdzie:

- φ_E – różnica ciągu arytmetycznego,
- k – dowolny stopień twardości.

Zgodnie z PN 71-59101, zmianie twardości ściernicy o jedną klasę według skali Nortona odpowiada zmiana udziału objętościowego porów $V_p = 1,5\%$. Wobec powyższego, różnica ciągu arytmetycznego przeciętnych wartości modułu E ściernic ceramicznych w E -skali wynosi:

$$\varphi_E = 3 \times 1,5 = 4,5 \quad [\text{GPa}] \quad (70)$$

Zakładając rozkład normalny badanego parametru w poszczególnych klasach twardości oraz przyjmując 99,73% poziom ufności, wartość ta odpowiada 6 odchyleniom standardowym wartości przeciętnej, czyli: $6\sigma_E = 4,5$ GPa. Stąd można obliczyć granice zmienności modułu E dla danej (k) klasy:

$$E_{kmax} = \bar{E}_k + 3\sigma_E \quad [\text{GPa}] \quad (71)$$

$$E_{kmin} = \bar{E}_k - 3\sigma_E \quad [\text{GPa}] \quad (72)$$

Wykorzystując powyższe zależności oraz dane dotyczące udziału objętościowego porów V_p zgodnie z PN 71-59101 (tab. I), wyznaczono wartości średnie i graniczne modułu E dla poszczególnych klas twardości według skali Nortona. Utworzyły one skalę przedziałową opartą na tym parametrze – rys. 82.

MIĘKKIE											
E1	E2	F1	F2	G1	G2	H1	H2	I1	I2	J1	J2
E		F		G		H		I		J	
16,5		21,0		25,5		30,0		34,5		39,0	
14,25	18,75	23,25	27,75	32,25	36,75	41,25					

TWARDE											
K1	K2	L1	L2	M1	M2	N1	N2	O1	O2	P1	P2
K		L		M		N		O		P	
43,5		48,0		52,5		57,0		61,5		66,0	
41,25	45,75	50,25	54,75	59,25	63,75	68,25					

BARDZO TWARDE											
Q1	Q2	R1	R2	S1	S2	T1	T2	U1	U2	W1	W2
Q		R		S		T		U		W	
70,5		75,0		79,5		84,0		88,5		93,0	
68,25	72,75	77,25	81,75	86,25	90,75	95,25					

Moduł E [GPa]

Rys. 82. Skala wartości normatywnych modułu E ściernic ceramicznych
Fig. 82. Scale of nominal values of the modulus E for ceramic grinding wheels

Skala ta może być traktowana jako wzorzec wartości normatywnych modułu E , przy systemowej ocenie jakości projektowej Q_p ściernic ceramicznych o konwencjonalnej budowie. W skali tej dokonano podziału całego zakresu projektowej twardości (według skali Nortona) na trzy grupy jakościowe o różnicowanych własnościach systemowych:

1. narzędzia miękkie – klasa: E, F, G, H, I, J,
2. narzędzia twarde – klasa: K, L, M, N, O, P,
3. narzędzia bardzo twarde – klasa: Q, R, S, T, U, W.

Każda z grup zawiera po 6 klas, oznaczonych literami alfabetu łacińskiego, odpowiadających oznaczeniom twardości według historycznie ukształtowanej skali Nortona (E, F, G...).

Przedstawiona skala może być rozumiana jako ciąg rozkładów normalnych modułu E , opisywanych wartościami średnimi tego parametru dla określonej klasy oraz stałą wartością odchylenia standardowego $\sigma_E = 4,5/6 = 0,75$ [GPa]

$$N_1(\bar{E}_1; 0,75), N_2(\bar{E}_2; 0,75), \dots, N_k(\bar{E}_k; 0,75) \quad (73)$$

gdzie: k – numer klasy twardości.

Biorąc pod uwagę potrzeby użytkowników, możliwości pomiarowe akustycznych metod badania modułu E oraz system oznaczeń umownych, zaproponowano rozdzielenie zakresu każdej klasy na dwa podzakresy pomiarowe:

- opisany numerem 1 (np.: H1, K1, Z1), co oznacza, że zmienna losowa E znajduje się pomiędzy wartością minimalną $(E_{min})_k$ a wartością średnią $(\bar{E})_k$ dla danej (k) klasy,
- opisany numerem 2 (np.: H2, K2, Z2), co oznacza, że zmienna losowa E znajduje się pomiędzy wartością średnią $(\bar{E})_k$ a wartością maksymalną $(E_{max})_k$ tej (k) klasy.

W przyjętym systemie wartości wzorcowych modułu E przewiduje się stosowanie przedziałów lewostronnie domkniętych, czyli:

$$(E_{min})_k \leq (E)_k < (E_{max})_k \quad (74)$$

Zastosowanie takiego systemu wartości wzorcowych daje większą możliwość oceny jakościowej ściernic i ustalenia partii narzędzi o bardziej jednorodnych własnościach.

W świetle wcześniej przedstawionych wyników badań, zmienna losowa E jest parametrem systemowym, który zależy nie tylko od udziału objętościowego por V_p w ściernicy, ale także od innych pozostałych wielkości materiałowych charakteryzujących ściernicę oraz warunków procesu wytwarzania. Wpływ tych czynników jest zdecydowanie słabszy i w sensie ogólnego wzorca normatywnego jakości projektowej może być pominięty. Nie można bowiem dokonać wyznaczenia wartości normatywnych, w sensie ogólnym, nie uwzględniając zdolności jakościowej procesu wytwarzania danego producenta. Po ustaleniu tych danych można dokonać badania rozpoznawczego modułu E , a następnie przyporządkować określone oznaczenie umowne z E -skali i wykorzystywać je następnie jako wartość normatywną.

Przyjmując za określoną zdolność jakościową procesu wytwarzania ściernic ceramicznych z Al_2O_3 w Fabryce Materiałów i Wyrobów Ściernych KORUND w Kole (obecnie: Saint Gobain Abrasives) zbadano: jaka jest korelacja pomiędzy uogólnionymi wartościami normatywnymi modułu E według E -skali, a szczegółowymi wartościami wzorcowymi tego parametru, ujętymi normą technologiczną tego producenta. Wyniki porównawcze zestawiono w tab. VI.

Tab.VI. Porównanie wartości normatywnych modułu E z wartościami ujętymi normą technologiczną określonego producenta

Tab.VI. Comparison of the nominal values of the modulus E with the values specified in the process standard of respective manufacturers

Numer ziarna ↓	Twardość według skali Nortona													
	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	F2	G2	H2	I1	I2	J2	M1	N1	N2	P1	P2	Q2	R2	S2
30	F2	G2	H2	I1	I2	J2	M1	N1	N2	⁵ P1	P2	Q2	R2	S2
36	F2	⁸ G2	H2	I2	K1	L2	M2	N2	O2	P2	Q1	R2	S1	T1
46	F2	G2	H2	I2	K2	L2	N1	O1	P1	P2	Q2	R2	S2	
54	F2	G2	H2	I2	K2	L2	N1	O1	P1					
60	F2	G2	H2	K1	L2	M2	O1	N2	O1	O2	P2	Q2	R1	
70	F2	G2	H2	K1	L2	M2	N1	N2	O1	⁷ O2	P2	Q1	R1	
80	F2	G2	H2	J2	⁵ L2	M1	N1	N2	O1	⁷ P1	P2			
90	F2	G2	I2	J2	L1	L2	M2	N2	O1	P1				
100	F2	H1	I2	K1	L1	M1	N1	N2	O2	P1				
120	G1	H1	I1	I1	J2	K2								
150	G1	H1	I1	J1	J2	K2	L2	⁹ L2	M2					
180	G1	H1	I1	I2	K1	L1	L2	⁹ M1	N1					
220	G1	H1	I1	I2	K1	L1	L2	M2						

⁵ - numer struktury ściernicy

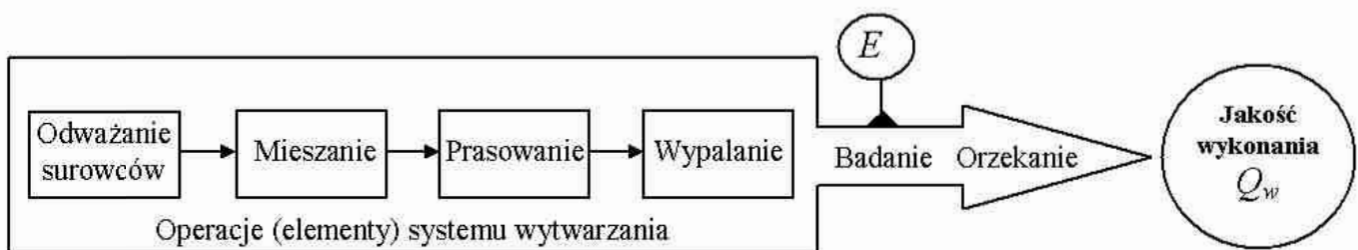
Dane zamieszczone w powyższej tabeli pokazują, że dany producent przy ocenie jakości ściernic według modułu E stosuje wzorcowanie tego parametru uzależnione nie tylko od twardości, ale także od numeru ziarna i struktury ściernicy. Przy takim wzorcowaniu, tą samą symboliką twardości oznaczane są narzędzia charakteryzujące się innymi własnościami sprężystymi (opisywanymi modułem E). Przykładowo: tym samym symbolem „M” oznaczone będą ściernice o wartościach modułu E : odpowiadającym temu oznaczeniu (M1, M2), wartościach mniejszych (L2) oraz większych (N1, O1). Posługiwanie się wartościami wzorcowymi według E usunęłoby tę niejednoznaczność.

ROZDZIAŁ 4

OCENA JAKOŚCI WYKONANIA PARTII ŚCIERNIC

Myśli projektanta i konstruktora, zawarte w projekcie, na etapie produkcji materializują się w konkretnym wyrobie. Należy dążyć do tego, aby zapewnić jak najwyższą wierność przeniesienia jakości projektowej na jakość wykonania [31]. Celem systemowej oceny jakości jest więc dokonanie osądu, czy w procesie projektowania uzyskano odpowiednią jakość typu, a w procesie wytwarzania jaka jest „wierność” przeniesienia jej na poszczególne egzemplarze danego typu. Miara jej wyznacza zdolność jakościową określonej maszyny lub procesu [20].

Ustalone na etapie projektowania parametry budowy ściernicy realizowane są fizycznie w procesie wytwarzania. Na proces ten składają się określone operacje, wynikające z przyjętej technologii wytwarzania narzędzi danego typu. Do podstawowych operacji technologicznych wytwarzania ceramicznych narzędzi ściernych zaliczyć należy: odważanie surowców (ziarna i spoiwa, środków porotwórczych), mieszanie tych surowców, prasowanie oraz wypalanie. Operacje te tworzą określony system wytwórczy SW , funkcjonujący u danego producenta. Celem istnienia tego systemu jest wytwarzanie dobrych jakościowo narzędzi. Badane są więc istotne parametry wytworzonych narzędzi na zgodność z odpowiednimi normami (najczęściej na podstawie próbkowania) i na tej podstawie orzeka się o ich jakości wykonania Q_w – rys. 83.



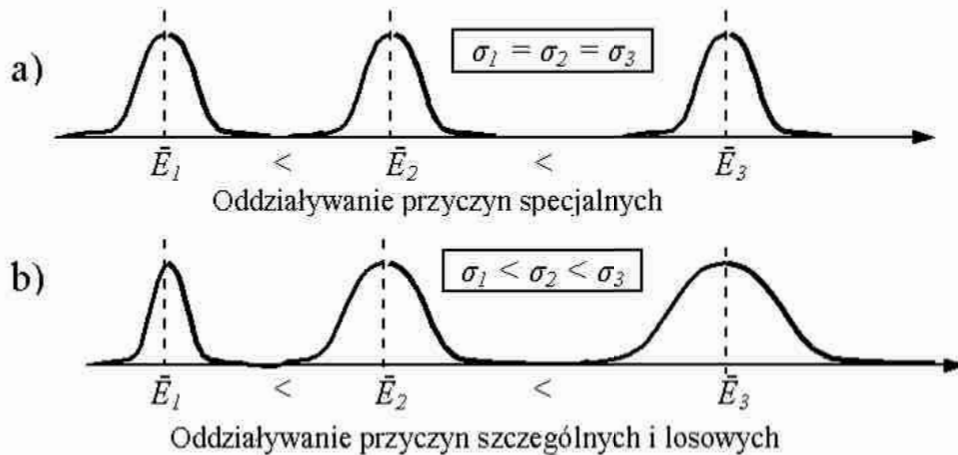
Rys. 83. Model powiązań systemowych przy ocenie jakości wykonania Q_w

Fig. 83. Model of system connections with product quality assessment

Każdy proces realizacji, zwłaszcza przemysłowy, charakteryzuje pewna niestabilność, wynikająca z różnych oddziaływań, która powoduje rozrzut cech wyrobu. Dopuszczalny poziom tego rozrzutu określają wartości normatywne zawarte w dokumentacji konstrukcyjnej lub technologicznej [46].

Partie ściernic o tej samej charakterystyce, wytwarzane w tych samych warunkach, mogą więc wykazywać pewien rozrzut w zakresie modułu E , związany

ze zmiennością procesową. Rozrzut ten opisywany jest określonym typem rozkładu, a jego miarą położenia jest wartość przeciętna (\bar{E}), a miarą rozproszenia odchylenie standardowe (σ). Wychodząc z ustaleń Shewharta, że charakter zmienności procesowej zależy od tego, czy było to działanie przyczyny szczególnej czy losowej [74], można wydzielić te dwie grupy przyczyn, analizując wartości tych dwóch miar rozkładu – rys. 84.



Rys. 84. Zmienność procesowa wywołana oddziaływaniem innej grupy przyczyn
Fig. 84. Process variability affected by other group of reasons

Przyczyny szczególne (specjalne) występują w niewielkiej ilości i wynikają ze specjalnego oddziaływania na proces (np. zmiana udziału objętościowego spoiwa przypadającego na ziarno ściernic, na skutek błędu podczas dozowania składników masy ściernic). Skutek takiej zmiany jest duży i można go wykryć przez analizę miary położenia (\bar{E}) badanego parametru (rys. 82 a).

Przyczyny losowe wynikają z natury samego systemu, są to więc przyczyny systemowe. Cechują się tym, że jest ich wiele. Ich skutek oddziaływania w porównaniu do przyczyn specjalnych jest mały. Z drugiej strony, łączny skutek przyczyn losowych jest dość znaczny [74]. Oddziaływanie przyczyn szczególnych i losowych można wykryć przez analizę obu miar: położenia (\bar{E}) i rozproszenia (σ) rys. 82b. Jeśli skutek oddziaływania tych przyczyn (w postaci kształtu i położenia rozkładu) jest nie do zaakceptowania, to system wytwarzania *SW* wymaga ulepszenia, bowiem realizowany w tym systemie proces nie charakteryzował się odpowiednią zdolnością jakościową.

4.1. Mierniki jakości wykonania partii wyrobów

Do oceny jakości wykonania partii wyrobów, zwłaszcza w odniesieniu do staranności prowadzonego procesu, stosuje się dwa mierniki [44]:

- wadliwość (a także sprzężoną z nią poprawność),
- przeciętną liczbę wad w ustalonej jednostce wyrobów.

Wadliwość określana jest prawdopodobieństwem zdarzenia losowego, polegającego na tym, że egzemplarz pobrany z partii lub strumienia wyrobów nie spełnia postawionych wymagań. Może być ona miarą poziomu jakości wykonania tej partii tylko wówczas, gdy istnieje potrzeba i możliwość wyróżnienia jednostek, które spełniają wymagania jakościowe, i takich, które tych wymagań nie spełniają. Jeżeli nie jest to możliwe, wówczas stosuje się (jako miernik) przeciętną liczbę wad w ustalonej jednostce wyrobów. Jakość partii wyrobów jest najwyższa, gdy wadliwość jest równa 0, najniższa natomiast, gdy przyjmie wartość 1.

Przeciwieństwem wadliwości jest **poprawność**. Przyjmuje ona wartości z przedziału [0–1] lub z przedziału [0–100%]. Sumując wadliwość i poprawność każdego ustalonego zbioru (partii) albo strumienia wyrobów uzyskuje się wartość 1 lub 100%, stąd znając jedną miarę można wyznaczyć drugą.

W badaniach odbiorczych przyjmuje się zwykle, że miarą jakości wykonania partii wyrobów jest przeciętna liczba niezgodności w stu elementarnych jednostkach wyrażona w procentach (jednostką elementarną może być sztuka rzeczywista lub umowna). Na tej zasadzie oparte są procedury badań jakościowych (zawarte w standardach ISO oraz Polskich Normach) według których wyznacza się **wskaźnik AQL**. Określa on „akceptowany poziom jakości”, tj. taki, który w przypadku rozpatrywania ciągu sukcesywnie dostarczanych partii jest wartością graniczną zadowalającej średniej jakości procesu [31]. Plany badań bazujące na *AQL* dotyczą więc bardziej średniego poziomu jakości produkcji, niż jakości pojedynczo dostarczanej partii. Dają się dobrze stosować do:

- kontrolowania i sterowania procesów ciągłych,
- zabezpieczania odbiorców, którzy odbierają od dostawcy większość jego produkcji

Standaryzacja oparta na wskaźniku *AQL* jest korzystna, bowiem oznacza [145]:

1. jasne sformułowanie wymagań, które muszą być dotrzymane,
2. wdrożenie systemu sprawdzania i kontroli tych wymagań,
3. konieczność modernizacji procesu, w przypadku ich niedotrzymania.

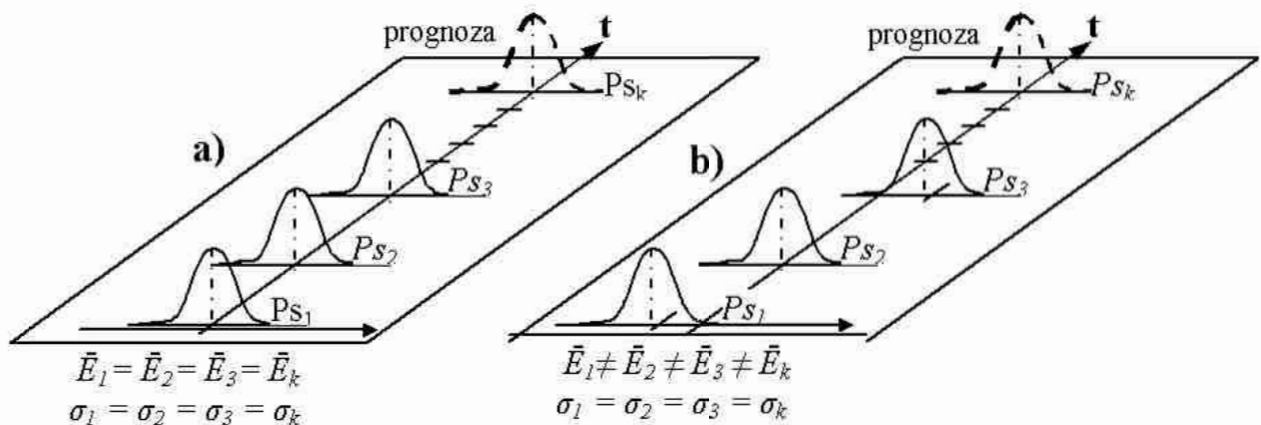
W zakresie mierników dotyczących jakości wykonania partii wyrobów o dużej liczności, korzysta się głównie z metod [31]:

- statystycznej kontroli odbiorczej (SKO),
- statystycznej kontroli procesu (SKP).

Kontrola typu **SKO** jest ukierunkowana na wyrób i stanowi podstawę podejmowania decyzji o tym, czy partia wyrobów, z których pobrano próbkę, może być przyjęta czy też odrzucona lub poddana dodatkowej kontroli 100-

procentowej. Kontrola ta ma charakter bierny, gdyż daje małe możliwości korygowania procesu. SKP jest natomiast kontrolą o charakterze czynnym i ukierunkowaną na proces. Jej wyniki nie są wykorzystywane do oceny wyrobów w kategoriach zgodności z wymaganiami, lecz do rozpoznania, czy na proces nie oddziałują czynniki zakłócające jego przebieg. Stanowią więc podstawę bieżącej oceny jakości procesu. Kontrola tego typu zwykle połączona jest z kartami kontrolnymi Shewharta. Stanowi wówczas ważny element statystycznego sterowania procesem SPC [31]. Metoda SPC jest jedną z podstawowych metod zapewniania zdolności jakościowej procesu, zalecaną przez wiele norm, np. ISO 9001, QS 9000. Tego typu nadzorowanie procesu prowadzi do jego ustabilizowania oraz statystycznie przewidywalnego rozkładu danej cechy (PN-ISO 8258+AC1:1996).

Przy systemie statystycznego kontrolowania procesu wytwarzania narzędzi ściernych prognoza dotycząca modułu E może się opierać na powtarzalności obu parametrów rozkładu: wartości średniej \bar{E} oraz odchylenia standardowego σ (rys. 85a) lub tylko na powtarzalności odchylenia standardowego σ w poszczególnych (p_s) partiach narzędzi (rys. 85b). To drugie postępowanie jest podstawą jakościowej „zasady stratyfikacji”, która polega na tym, że nie należy mieszać wyrobów pochodzących od różnych producentów, inaczej bowiem uniemożliwia się efektywną analizę przyczynową.

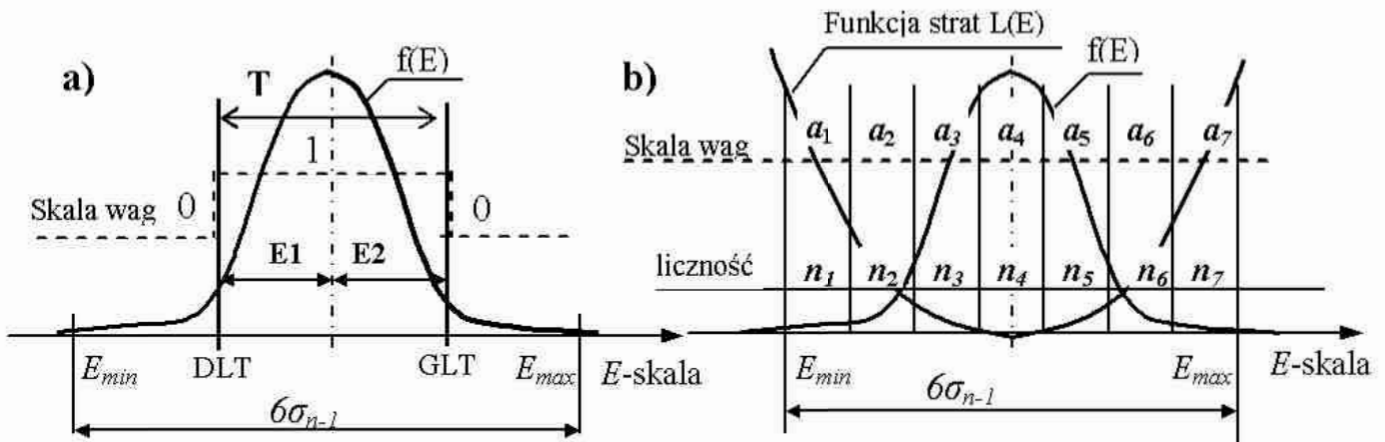


Rys. 85. Prognozowanie jakości wykonania partii na podstawie stałej wartości miar rozkładu badanej zmiennej: a) położenia (\bar{E}), b) rozproszenia (σ)

Rys. 85. Forecasting of batch quality assessment on the basis of constant value of measures of examined variable distribution for: a) position (\bar{E}), b) scattering (σ)

Zdatność jakościowa procesu jest pojęciem związanym ze zmiennością charakteryzującą proces danego producenta. Znając parametry statystyczne opisujące rezultaty tego procesu oraz przewidzianą dla nich tolerancję T można określić spodziewaną wadliwość lub poprawność procesu. W tym zakresie, w odniesie-

niu do narzędzi ściernych, standardowy wskaźnik jakości wykonania Q_{ISO} może opierać się na tradycyjnym, taylorowskim modelu spełnienia wymagań jakościowych, lub nowoczesnym, wykorzystującym koncepcję strat jakościowych Taguchiego – rys.86.



Rys. 86. Modele oceny zdolności jakościowej procesu:

a) oparty na funkcji Taylora, b) oparty na funkcji strat Taguchiego

Fig. 86. Models of process quality rating assessment: a) based on Taylor function, b) based on Taguchi's loss function

Funkcja poprawności procesu wytwarzania ściernic $Q_{ISO}(E)$, oparta na tradycyjnym taylorowskim modelu spełnienia wymagań (rys. 86.a), ma postać funkcji skokowej:

$$Q_{ISO}(E) = \begin{cases} 1 & DLT \leq E < GLT \\ 0 & E > GLT \text{ lub } E < DLT \end{cases} \quad (75)$$

Według takiego modelu (opartego na rozkładzie 0–1) przyjmuje się, że wszystkie wyroby mieszczące się w zakresie tolerancji są jednakowo dobre, (niezależnie od miejsca położenia) i wobec tego dla nich waga $a = 1$ (dla pozostałych natomiast $a = 0$). Jakość wykonania Q_w każdej ściernicy, której wyznaczona wartość modułu E znajduje się w polu tolerancji T , jest zatem taka sama. Standardowy wskaźnik jakości Q_{ISO} dla partii ściernic jest prawdopodobieństwem p znalezienia ściernic o module E znajdującym się w wyznaczonym polu tolerancji

$$Q_{ISO} = n \cdot a = n \cdot 1 = n/N = p \quad (76)$$

Przy tym postępowaniu każdej zmiennej E , otrzymanej w procesie kwantyfikacji, odpowiada pewien zbiór wartości E^o , będący podzbiorem liczb rzeczywistych i nieujemnych. Dla potrzeb oceny jakości wykonania zbiór ten jest dzielony na dwa podzbiory:

- podzbiór wartości pożądaných E^+ ,
- podzbiór wartości niepożądaných E^- .

Istnieje przy tym zależność:

$$E^+ \cup E^- = E^0 \quad (77)$$

oraz jednocześnie

$$E^+ \cap E^- = \emptyset \quad (78)$$

Możliwość podziału zbioru na podzbiory o różnych stanach, traktuje się jako elementarny warunek wykorzystania dowolnej zmiennej w procesie sterowania jakością [44].

Funkcja poprawności procesu, oparta na modelu Taguchiego (rys. 86.b), ma postać funkcji parabolicznej. Oznacza to, że im bardziej odległa jest zmierzona wartość modułu E od wartości oczekiwanej \bar{E} , tym szybciej maleje wskaźnik Q_{ISO} jakości wykonania i ściernica jest coraz mniej przydatna do realizacji postawionego zadania. Jest to zgodne z nowoczesnym podejściem do jakości, opartym na ustaleniach G. Taguchiego (międzynarodowego konsultanta w dziedzinie zapewniania jakości), który wskazał, że wyrób nie mający optymalnej charakterystyki (stany cech różnią się od teoretycznie najlepszych) posiada niższe wartości użytkowe i jest mniej odporny na działanie zakłóceń, niż wyrób o charakterystyce optymalnej [31].

Przyjęcie tego podejścia należy uznać za właściwe i ono będzie dalej stosowane w ocenie jakości wykonania partii ściernic producentów krajowych i zagranicznych.

Przy tym podejściu stosuje się metodę selekcji grupowej, tj. obszar zmienności ($E_{\min} \div E_{\max}$) dzieli się na podklasy o określonych wagach (im dalej od wartości oczekiwanej podklasy według E -skali, tym mniejsza waga a) oraz wylicza się prawdopodobieństwo zdarzenia losowego, że badana zmienna E znajdzie się w zakresie danej podklasy jakości.

Przy tym podejściu wskaźnik Q_{ISO} , określający zdolność jakościową procesu, przedstawia się następująco:

$$Q_{ISO} = n_1 \cdot a_1 + n_2 \cdot a_2 + n_3 \cdot a_3 + \dots + n_k \cdot a_k \quad (79)$$

Liczność n_i ściernic, w określonej grupie selekcyjnej (podklasie i), obliczana jest z zależności:

$$n_i = \Delta P = P_{ip} - P_{il} \quad (80)$$

gdzie:

- P_{ip} – prawdopodobieństwo dla prawej granicy danej podklasy i ,
- P_{il} – prawdopodobieństwo dla lewej granicy danej podklasy i .

Ponieważ rozkład zmiennej E dobrze opisuje rozkład normalny [122], to do wyznaczenia prawdopodobieństw p należy korzystać z funkcji dystrybuanty rozkładu normalnego $\Phi(u)$. Do tego celu wyznacza się zmienną unormowaną u rozkładu normalnego zgodnie z wzorem [52]:

$$u = \frac{E_g - \bar{E}}{\sigma_{n-1}} \quad (81)$$

przy czym:

- E_g – wartość graniczna rozpatrywanej podklasy wg E -skali (minimalna lub maksymalna),
- \bar{E} – estymowana wartość średnia z badanej próbki ściernic,
- σ_{n-1} – odchylenie standardowe dla populacji.

Do wyznaczenia wartości wag a można zastosować następujące rozumowanie: w przypadku stosowania skali twardości Nortona (i sprzężonej z nią E -skali) typem zmiennej jest nominanta. Maksimum jakości odpowiada tu pewnej określonej wartości (X_{nom}), a wszelkie odchylenia procesu od tej wartości, zarówno in plus, jak i in minus – obniżają jakość. Przy ocenie zdolności jakościowej procesu według wskaźnika Q_{ISO} , nominanta ta przyjmie wartość pola tolerancji użytkowej $T_u = f(E)$.

Z przeprowadzonych badań wynika, że wpływ zmienności modułu E w ramach jednej podklasy z E -skali na wyniki pracy tych narzędzi jest nieistotny nawet w zautomatyzowanym cyklu obróbki [56]. Wartość tolerancji użytkowej T_u modułu E może więc być przyjęta na poziomie 2,25 GPa. Wartość tolerancji rzeczywistej tego parametru przyjmowana przez producenta nie przekracza 2 klas wg E -skali, czyli $T_r \leq 9$ GPa. Stosunek tolerancji użytkowej T_u do tolerancji rzeczywistej T_r określa przydatność użytkową ściernic, a tym samym ich wagę:

$$a = \frac{T_u}{T_r} \quad 0 \leq a \leq 1 \quad (82)$$

Wartości tego stosunku są podstawą skalowania jakości wykonania Q_w partii ściernic ceramicznych. Zapis takiego skalowania podano w tab. VII.

Tab. VII. Oznaczenie klas jakości wykonania partii ściernic według modułu E

Tab. VII. Qualitative determination of grinding wheel batch conformance according to the modulus E

T_u [GPa]	T_r [GPa]	a	Jakość wykonania Q_w	Klasa jakości
2,25	2,25	1	Ponadnormatywna	1
2,25	4,5	0,5	Normatywnie dobra	2
2,25	6,75	0,33	Normatywnie umiarkowana	3
2,25	9,00	0,25	Normatywnie niska	4
2,25	∞	0	Pozanormatywna (zła)	5

Ponieważ dla trwałości ściernicy korzystniejsza jest większa wartość E , można przyjąć, że ściernica posiada 1. klasę jakości wykonania, jeżeli zmierzona wartość tego parametru mieści się w podklasie 2., czyli znajdującej się powyżej wartości średniej dla projektowanego symbolu twardości (według skali Nortona). Ściernice o module E z sąsiednich podklas tej skali (lewej i prawej) będą więc wykonane w 2. klasie jakości wykonania, dalsze w 3, jeszcze dalsze w 4., a wszystkie pozostałe w 5. Wagi a utworzą zatem ciąg wartości w układzie parabolicznym, zgodnym z charakterem przebiegu funkcji strat Taguchiego. Przykład takiego ciągu, dla hipotetycznej ściernicy o twardości M, pokazano w tabelicy VIII.

Tab. VIII. Przykład skalowania jakości wykonania ściernic o twardości „M”

Tab. VIII. Example of quality graduation of grinding wheels with hardness “M”

Zakres	< K2	L1	L2	M1	M2	N1	N2	O1	> O2
Waga a	0	0,25	0,33	0,5	1	0,5	0,33	0,25	0
Kl. jakości	5	4	3	2	1	2	3	4	5

Badania zdolności jakościowej procesu wytwarzania ściernic ceramicznych opierają się na ocenie jednorodności partii tych narzędzi. Jednorodność tę bada się według przyjętego kryterium pomiarowego (inne kryterium – inne wyniki) na wybranej losowo próbce wyrobów o liczności n . Istotne zatem staje się pytanie: jak liczna musi być próbka badawcza, aby uzyskać zadowalający wynik pomiaru?

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika, że przy pomiarach modułu E metodami akustycznymi błąd względny pomiaru opisać można zależnością [130]:

$$\delta = 0,409 + 4,66/n \quad [\%], \quad (83)$$

gdzie n – liczba badanych narzędzi.

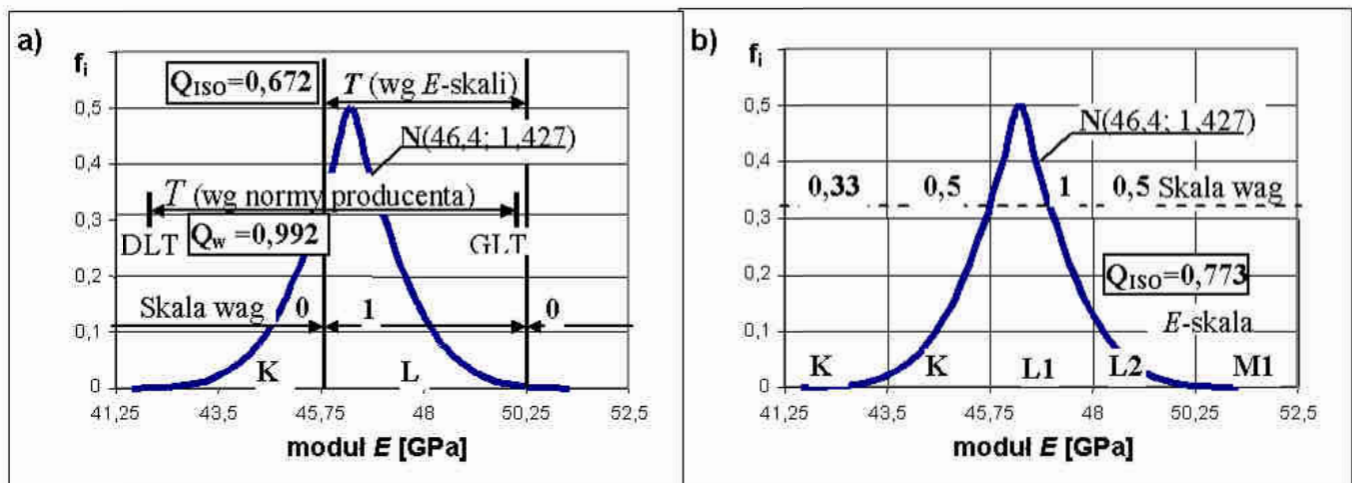
Z zależności tej wynika, że przy 2 próbkach wziętych z partii ściernic do oceny jakości wykonania (tak jak to zwykle praktykują producenci) błąd pomiaru jest

mniejszy od 3%. Praktycznie zatem wystarczy badać 3–5 ściernic, aby wyznaczyć jakość wykonania partii ściernic (na podstawie modułu E) z błędem nie większym niż 2%. Chcąc uzyskać wyniki z błędem mniejszym niż 1%, należałoby do badań stosować próbkę badawczą o licznosci 8 sztuk. Przy próbce badawczej o licznosci $n = 30$ sztuk błąd pomiaru stabilizuje się na poziomie 0,5% i dalsze zwiększanie licznosci próbki nie ma istotnego znaczenia dla poprawy dokładności wyników.

4.2. Ocena jakości wykonania ściernic producentów krajowych

W celu ustalenia wpływu niestabilności procesu wytwarzania ściernic ceramicznych na moduł E , przeprowadzono szerokie badania tych narzędzi, wytwarzanych przez różnych producentów w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych. Parametr ten wyznaczano metodami akustycznymi według podanej uprzednio metodyki, właściwej dla danej grupy typowymiarowej. Stopień jakości wykonania Q_w partii ściernic oceniano według wskaźnika Q_{ISO} , obliczanego na podstawie modelu z funkcją strat Taguchiego.

Celem porównania stosowanego postępowania z tradycyjnym, opartym na modelu Taylora, na rys. 87 przedstawiono wyniki oceny jakości wykonania ściernic o charakterystyce: 1C 600x63x305/38A180L9VBE (B5) dla obu tych modeli. Ściernice te zostały wyprodukowane w FMiWŚ KORUND w Kole. Licznosc próbki badawczej wynosiła 30 szt.



Rys. 87. Ocena jakości wykonania ściernic wg modelu: a) Taylora, b) Taguchiego

Rys. 87. Quality assessment of grinding wheels according to models: a) Taylor's, b) Taguchi's

Z przeprowadzonych badań wynika, że rozrzut modułu E dla partii ściernic danego typu, jest rzędu 2 klas według E -skali. Z odniesienia uzyskanego rozkładu do normy technologicznej danego producenta wynika, że występuje bardzo duża zgodność ($Q_w = 0,992$). Normatywny zakres zmienności modułu E jest jednak mało rygorystyczny; dopuszcza bowiem zmienność rzędu 8 GPa. Tak

szeroki zakres tolerancji tego parametru jest korzystny z punktu widzenia producenta, ale mniej korzystny dla użytkownika. Oznacza to bowiem, że w danej partii mogą się znajdować ściernice o zróżnicowanej twardości, odpowiadającej klasie K oraz L wg E -skali. Oprócz niejednoznaczności opisu, może to wpływać na praktycznie uzyskiwane wyniki szlifowania.

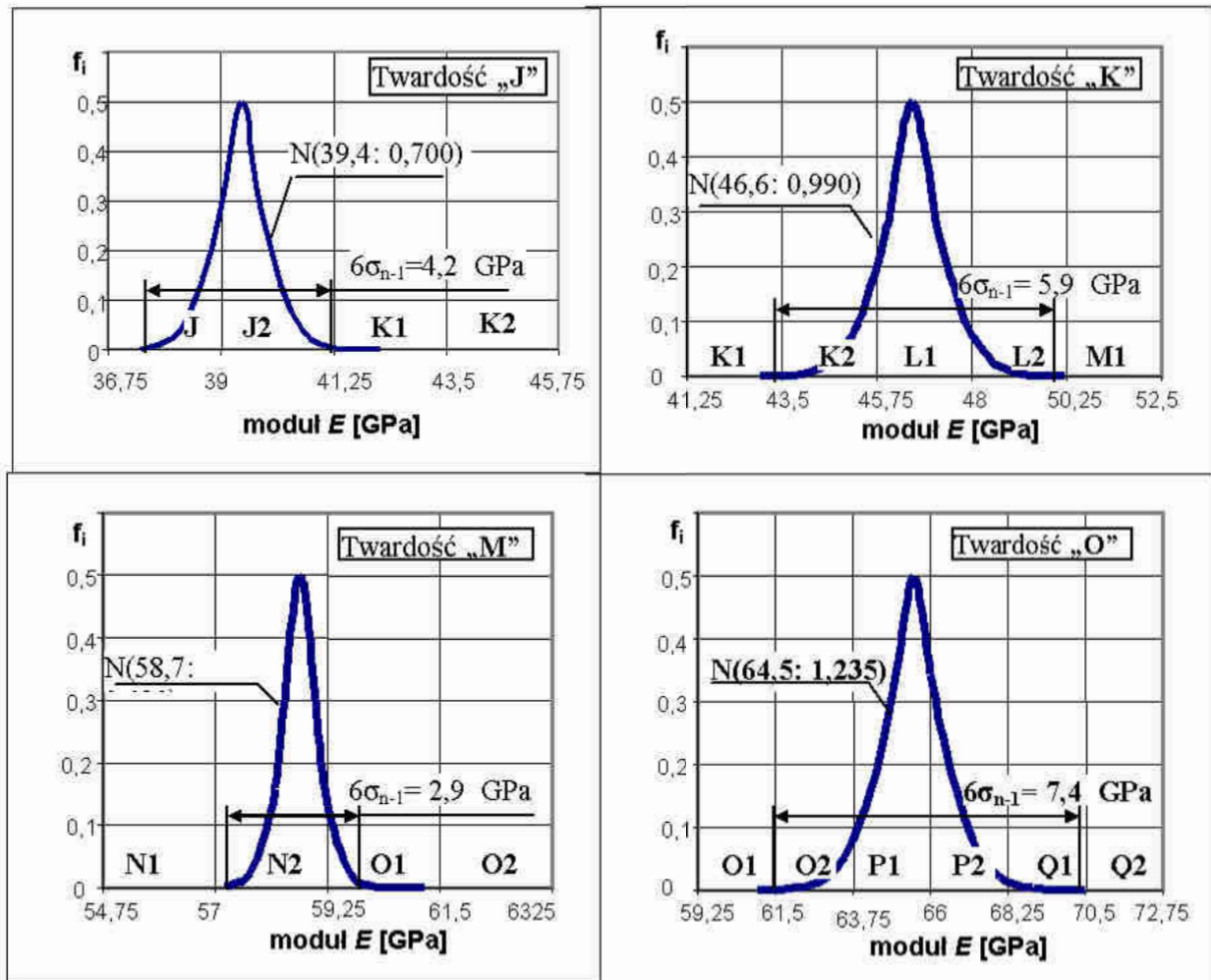
Jeżeli przyjąć założenie, że zmienność badanego parametru winna odpowiadać tej i tylko tej klasie twardości, która była intencją projektanta, to wówczas normatywna tolerancja modułu wynosiłaby 4,5 GPa (rys. 87a). Wszystkie egzemplarze z danej partii mieszczące się w polu tolerancji, miałyby jakość wykonania równą $Q_w = 1$. Te, które nie spełniałyby postawionego warunku, miałyby wówczas jakość $Q_w = 0$ (postępowanie ocenowe oparte byłoby więc na modelu Taylora). Z przeprowadzonej analizy kwalitonomicznej wynika, że w takim przypadku wskaźnik jakości wykonania $Q_{ISO} = 0,672$. Korzystając z danych zamieszczonych w tab. VII można byłoby powiedzieć, iż dana partia ściernic charakteryzuje się normatywnie dobrą jakością wykonania.

Przy podzieleniu tej partii na grupy selekcyjne (zgodnie z podzakresami E -skali) i zastosowaniu wag zgodnie z funkcją strat Taguchiego (rys. 87b), wskaźnik zdolności jakościowej procesu jest o 10% większy (0,773). Wynika to z tego, że w tym modelu przykładana się różną wagę egzemplarzom ściernic należącym do różnych grup selekcyjnych (podzakresów E -skali) i przy sumowaniu można osiągnąć korzystniejszy wynik oceny. W tym przypadku wskaźnik jakości wykonania partii Q_{ISO} także odpowiada zakresowi normatywnie dobrej jakości wykonania. Oznacza to, że z obu modeli uzyskuje się porównywalne wyniki oceny, przy czym ze względu na poprawność metodologiczną bardziej właściwy jest model z funkcją strat Taguchiego i na tym modelu oparte będzie dalsze postępowanie ocenowe.

W celu sprawdzenia, czy dana zmienność procesowa modułu E jest wynikiem przyczyn losowych, zależnych od systemu wytwarzania danego producenta, czy też wpływ systemu jest nieistotny, przeprowadzono analizę kwalitonomiczną jakości wykonania 4 partii ściernic ceramicznych, o tej samej charakterystyce: 1C-250x32x76/99A36J...O6V (zmienna tylko twardość), wykonywanych w tych samych warunkach w FTŚ-Grodzisk Maz. Liczność próbki badawczej z każdej partii wynosiła $n = 8$ szt.

Z przeprowadzonych badań wynika, że w procesie wytwarzania tych narzędzi istnieje zmienność procesowa, która powoduje rozrzut badanego parametru. Rozrzut ten niezależnie od twardości ściernic może być opisany rozkładem normalnym o parametrach $N(\bar{E}, \sigma_{n-1})$. Odchylenie standardowe σ_{n-1} , będące miarą losowego rozproszenia wyników (zmienności systemowej danego producenta), jest jednak zróżnicowane, zarówno co do wartości, jak i trendu. Przedział naturalnej zmienności, opisywany parametrem 6σ , zawiera się od wartości 2,9 GPa dla twardości „M”,

do 7,4 GPa dla twardości „O”. Nie ma także określonej linii trendu tego parametru w funkcji twardości ściernicy. Oznacza to, że rozrzut modułu E , określający jakość wykonania produkowanych u danego producenta ściernic, jest wywołany zarówno przyczynami systemowymi, jak i specjalnymi (zmiana twardości) – rys.88.



Rys. 88. Rozkłady modułu E partii ściernic ceramicznych o różnej twardości

Fig. 88. Distribution of the modulus E for a lot of ceramic grinding wheels with different hardness

Przedstawione wyżej rozkłady modułu E uzyskane zostały z estymacji wyników próbek o liczności $n = 8$ szt. W celu weryfikacji wyników i ustalenia, czy parametry rozkładu nie są obarczone dużym błędem, wynikającym z badania próbek o małej liczności, przeprowadzono szerokie badania na 15 partiach ściernic o liczności 100 sztuk każda. Badano partie ściernic małogabarytowych o charakterystyce: CrA80J7V(A...E), wyprodukowanych przez firmę: Inter-Diamet w Grodzisku Maz.). Były to ściernice o trzech typowymiarach: 1C-55x32x16, 1C-35x20x10, 1C-17x20x6, wykonane z 5 różnych spoiw ceramicznych oznaczonych literami: A, B, C, D, E.

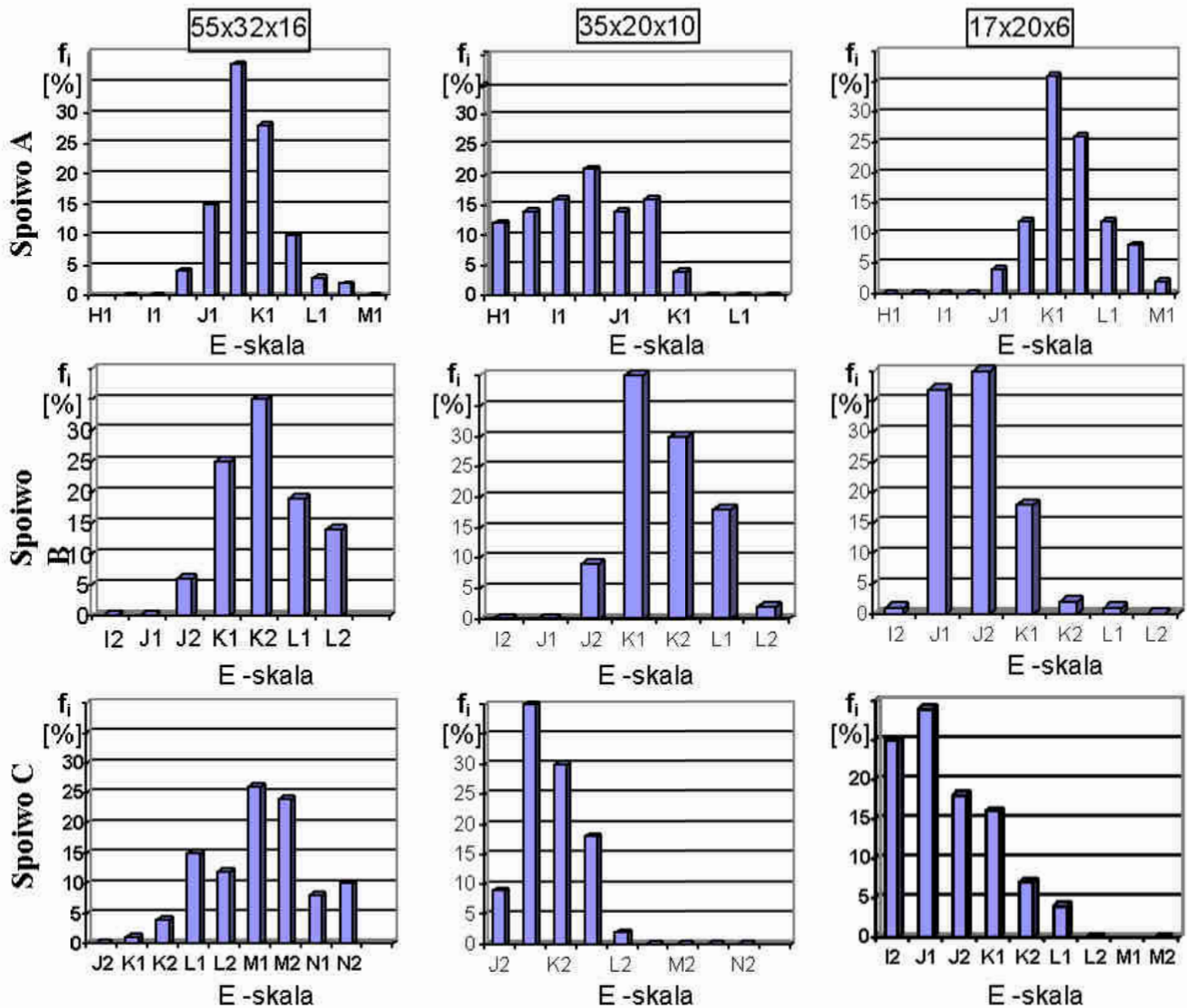
Wielkości statystyczne uzyskane z badań zestawiono w tab. IX, przy czym: σ_{n-1} jest wartością odchylenia standardowego dla populacji, estymowanego z war-

tości σ_n uzyskanej z badań, a stosunek (σ_{n-1}/\bar{E}) określa współczynnik zmienności v badanej zmiennej losowej E .

Tab. IX. Wielkości statystyczne modułu E ściernic z produkcji przemysłowej
Tab. IX. Statistic quantities of the modules E of commercial grinding wheels

Typ spoiwa	1C-55x32x16		1C-35x20x10		1C-17x20x6	
	\bar{E} [GPa]	σ_{n-1} [GPa]	\bar{E} [GPa]	σ_{n-1} [GPa]	\bar{E} [GPa]	σ_{n-1} [GPa]
A	41,0	3,11	40,4	2,86	43,8	2,89
B	45,0	2,41	44,0	2,16	40,0	1,93
C	51,8	3,74	44,9	2,78	39,4	3,52
D	46,6	2,65	40,5	3,3	41,7	1,87
E	52,4	3,9	46,5	1,9	47,8	3,98

Graficzny obraz uzyskanych rozkładów dla spoiw: A,B,C pokazano na rys. 89.



Rys. 89. Rozkład modułu E w partiach ściernic produkcji przemysłowej

Rys. 89. Distribution of the modules E in lots of commercial grinding wheels

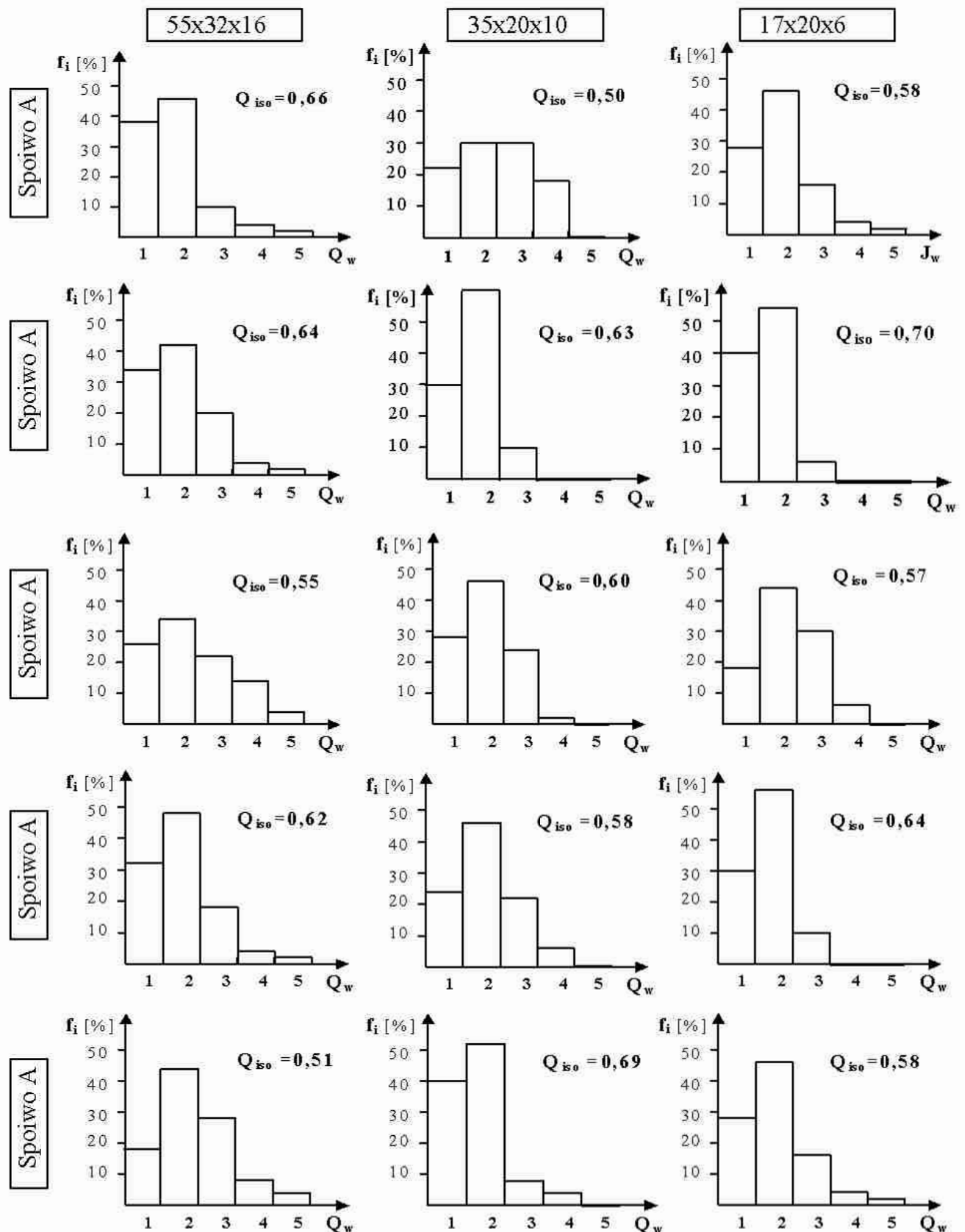
Z uzyskanych danych zestawionych w tab. IX i pokazanych, przykładowo, na rys. 89 wynika, że istnieje zmienność procesowa badanego parametru, zależna zarówno od typu zastosowanego spoiwa ceramicznego, jak i rozmiarów wytwarzanego narzędzia ściernego.

Zmienność wartości średniej modułu \bar{E} wraz ze zmianą typu spoiwa jest wywołana przyczynami specjalnymi (zamierzonymi). Zmienność tego parametru wraz ze zmianą gabarytów ściernicy jest natomiast wynikiem przyczyn losowych – związanych z danym systemem wytwarzania, np. innym gradientem oddziaływania temperatur w trakcie wypalania. Analizując wartości miary rozproszenia wyników, czyli odchylenia standardowego σ_n , nie można jednak zaobserwować określonego trendu zmian. Parametru ten wraz ze wzrostem rozmiarów ściernicy albo rośnie, albo maleje. Oznacza to, że powstały rozrzut jest wynikiem oddziaływań losowych procesu. Jego wartość jest rzędu 2–3 klas twardości według E -skali. Niezależnie jednak od wartości tego rozrzutu, w każdym przypadku może być on (dla partii narzędzi o określonej charakterystyce) opisany rozkładem normalnym $N(\bar{E}, \sigma_{n-1})$. Przy 95% poziomie ufności parametry tego rozkładu nie są zależne w sposób istotny od liczebności próbki badawczej.

Mając te dane oraz przyjmując model strat jakościowych według funkcji Taguchiego, obliczono wskaźniki Q_{ISO} określające jakość wykonania danych partii narzędzi. Wartości tych wskaźników, na tle histogramów klas jakości wykonania Q_w badanych partii, pokazano na rys. 90.

Z przedstawionych histogramów wynika, że w świetle przyjętej klasyfikacji jakościowej według modułu E , w każdym przypadku badane partie charakteryzują się normatywnie dobrą jakością wykonania ($Q_{ISO} > 0,5$). Można zaobserwować jednak, że im większe są gabaryty ściernic, tym więcej egzemplarzy w partii mieści się w wyższych klasach jakości wykonania Q_w . Z testowania statystycznego wynika, że przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wpływ rodzaju spoiwa oraz gabarytów na wskaźnik Q_{ISO} jest statystycznie nieistotny.

Biorąc jednak pod uwagę różnice występujące pomiędzy wskaźnikami Q_{ISO} dla partii ściernic o różnych wymiarach można zauważyć, że najbardziej jednorodne jakościowo partie narzędzi uzyskuje się ze spoiwa oznaczonego jako C (różnica pomiędzy partiami wynosi tylko 9%), a najmniej jednorodne ze spoiwa A (30%). Ściernice ze spoiwa oznaczonego jako C będą więc wykorzystywane w największym stopniu do badań eksploatacyjnych dotyczących jakości użytkowej tych narzędzi.



Rys. 90. Histogramy jakości ściernic produkcji przemysłowej
Fig. 90. Bar charts of commercial grinding wheel quality

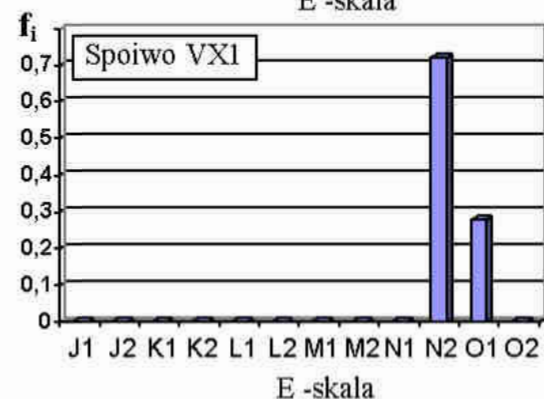
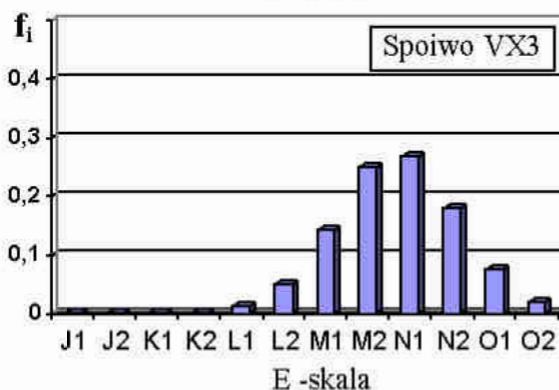
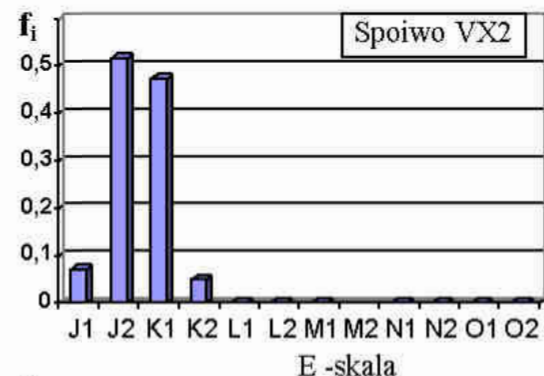
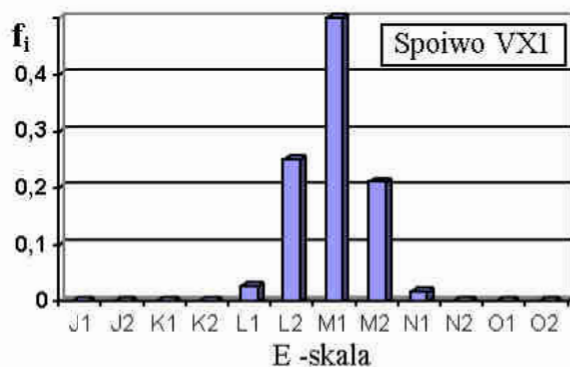
Dotychczas analizowane ściernice wykonywane były w warunkach standardowych procesów przemysłowych. W celu weryfikacji hipotezy, że oddziały-

wanie przyczyn losowych (systemowych) na jakość wykonania ściernic ceramicznych można zmniejszyć np. przez dokładne przestrzeganie parametrów procesu wytwarzania, zbadano ściernice o powyższej charakterystyce, wytworzone w ściśle kontrolowanych warunkach laboratoryjnych na Wydziale Chemii Nieorganicznej Politechniki Gdańskiej. Ściernice wykonywano z tego samego ścierniwa (elektrokorund chromowy CrA), ale z czterech różnych typów spoiw ceramicznych (X1,X2,X3,X4). Wielkości statystyczne modułu E tych partii narzędzi zestawiono w tab. X, a graficzny obraz pokazano na rys. 91.

Tab. X. Wielkości statystyczne modułu E ściernic z produkcji laboratoryjnej

Tab. X. Statistic quantities of the modules E of laboratory made grinding wheels

Typ spoiwa	Charakterystyka ściernic: 1C-35x20x10/CrA80J8VX(1...4)					
	\bar{E} [GPa]	σ_n [GPa]	σ_{n-1} [GPa]	$v = \sigma_{n-1}/\bar{E}$	σ_E [GPa]	$6\sigma_{n-1}$ [GPa]
VX1	53,5	1,67	1,715	0,032	0,33	10,29
VX2	41,2	0,90	0,924	0,022	0,18	5,54
VX3	55,1	3,20	3,286	0,060	0,64	19,71
VX4	59,0	0,43	0,442	0,007	0,08	2,65

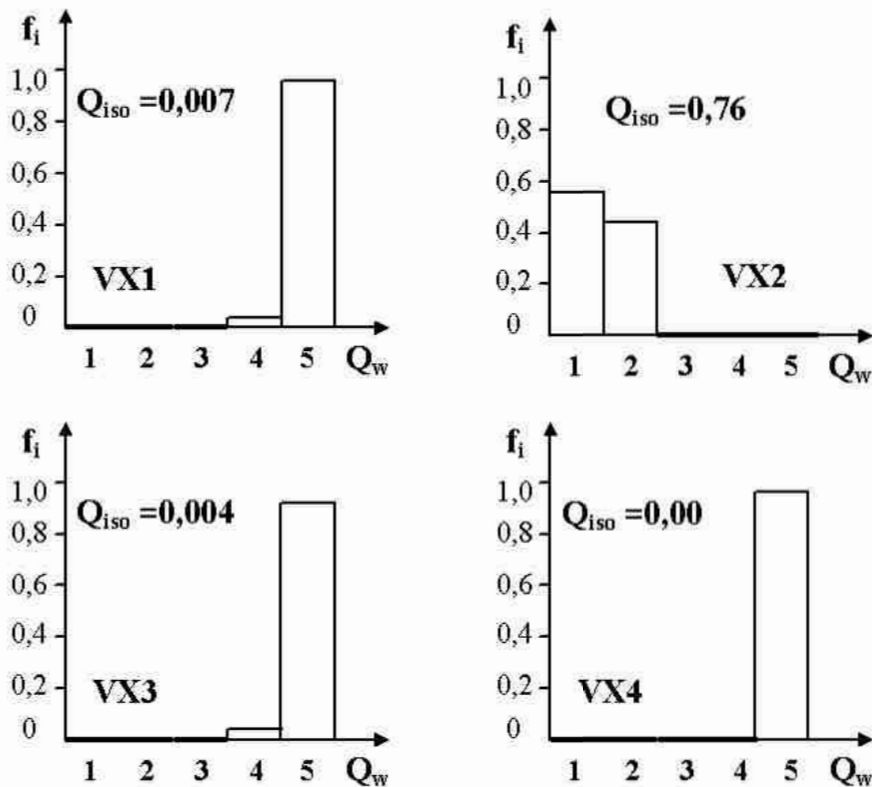


Rys. 91. Rozkłady modułu E ściernic ceramicznych z produkcji laboratoryjnej

Fig. 91. Distributions of the modules E in laboratory made grinding wheels

Z przedstawionych danych wynika, że nawet rygorystyczne przestrzeganie warunków procesu wytwarzania ściernic ceramicznych (warunki laboratoryjne) nie wpływa w sposób istotny na jednorodność partii narzędzi o jednakowej

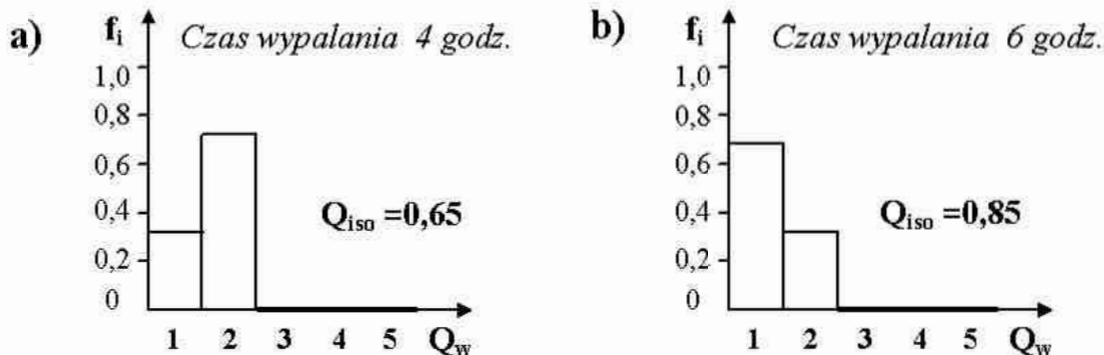
charakterystyce. Oddziaływanie przyczyn losowych, występujących w poszczególnych operacjach procesu wytwarzania, powoduje bardzo różną zmienność modułu E (opisaną wartością 6σ). Wynosi ona bowiem: od 2,65 GPa dla spoiwa VX4 do 19,71 GPa dla spoiwa VX3. Ta miara rozproszenia wyników dla ściernic ze spoiwa VX3, wykonywanych w warunkach laboratoryjnych, jest ponad 100% większa niż dla tego typu ściernic wykonywanych w warunkach przemysłowych. Oznacza to, że nawet bardzo ściśle przestrzeganie warunków procesu wytwarzania ściernic o spoiwie ceramicznym nie zapewnia uzyskania bardzo dużej jednorodności partii tych narzędzi. Rozrzut wyników zmiennej losowej E jest wywołany bowiem samą naturą procesu wytwarzania tych narzędzi i jako proces losowy nie poddaje się sterowaniu. Wobec powyższego, podczas użytkowania ściernic w partiach o dużej liczności należy mieć na uwadze fakt, iż w partii znajdować się mogą narzędzia zróżnicowane jakościowo. Dla badanych partii ściernic z produkcji laboratoryjnej zróżnicowanie to przedstawiono na rys. 92.



Rys. 92. Histogramy jakości wykonania partii ściernic z produkcji laboratoryjnej
Fig. 92. Bar charts of laboratory made grinding wheel quality

Z przedstawionych histogramów jakości wykonania badanych ściernic wynika, że tylko spoiwo oznaczone VX2 daje pozytywne rezultaty. Według wskaźnika Q_{ISO} tylko partia narzędzi wykonanych z tego spoiwa charakteryzuje się normatywnie dobrą jakością wykonania. Do dalszych badań, związanych z analizą wpływu warunków procesu wytwarzania na jakość ściernic, zastosowano zatem

tylko ten gatunek spoiwa. Badania przeprowadzono dla czasu wypalania $t = 4$ godzin oraz $t = 6$ godzin (przy stałej temperaturze wypalania: $T = 1000^{\circ}\text{C}$). Liczność próbek każdej partii wynosiła $n = 12$ szt. Uzyskane histogramy jakości wykonania Q_w tych ściernic pokazano na rys. 93.



Rys. 93. Wpływ czasu wypalania ściernic na jakość wykonania partii ściernic
Fig. 93. Quality of grinding wheel batch as a function of time of firing

Z uzyskanych danych wynika, że wzrost czasu wypalania ściernic wpływa korzystnie na zdolność jakościową procesu wytwarzania tych narzędzi. Przy zmianie czasu wypalania z 4 na 6 godzin uzyskuje się większą jednorodność partii narzędzi o tej samej charakterystyce: przy czasie wypalania 4 h rozrzut opisywany odchyleniem standardowym σ_n wynosił 1,47 GPa, natomiast przy czasie wypalania 6 h zmniejszył się do wartości 1,0 GPa. W konsekwencji spowodowało to wzrost licznosci w 1 klasie jakości wykonania i tym samym zwiększenie wskaźnika zdolności jakościowej procesu.

Przeprowadzone badania pozwalają na stwierdzenie, że moduł E ściernic ceramicznych jest zmienną losową. Losowość ta jest spowodowana zintegrowanym oddziaływaniem przyczyn szczególnych (zmiana rodzaju i składników budowy ściernicy), jak i systemowych (zmiana warunków procesu wytwarzania). Zmienność systemowa wynika z samej natury procesu wytwarzania tego typu narzędzi i może być sterowalna tylko w niewielkim stopniu. Powoduje to zróżnicowanie jakościowe partii narzędzi o jednakowej charakterystyce. Zróżnicowanie to może być wykryte na podstawie badań modułu E metodami akustycznymi. Pozwala to na stwierdzenie, że parametr ten jest dobrym kryterium przy systemowej ocenie jakości ściernic ceramicznych.

4.3. Ocena jakości wykonania ściernic producentów zagranicznych

Aby dokonać oceny porównawczej zdolności jakościowej procesów wytwarzania ściernic ceramicznych producentów krajowych i zagranicznych, zrobiono analizę kwalitonomiczną 6 partii tego typu narzędzi, pochodzących od trzech różnych producentów (Włochy, Czechy i Austria). Do badań wytypowano pro-

ducentów, których wyroby stosowano jako zamienniki ściernic krajowych do operacji zautomatyzowanej obróbki szlifowaniem wewnętrznych powierzchni walcowych pierścieni łożysk tocznych w FLT Kraśnik [59]. Charakterystyka tych narzędzi i licznosc próbek była następująca:

- * producent: Mole Mab – Włochy
 - 1C-60x30x20/9980KV 11 sztuk,
 - 1C-35x20x10/99AKV 5 sztuk,
- * producent: Keramika – Czechy
 - 1C-35x20x10/99A80KV 9 sztuk,
 - 1C-22x20x6 / 99A80KV 12 sztuk,
- * producent: Rappold – Austria
 - 1C-65x32x20/CrA80KV 7 sztuk,
 - 1C-16x25x6/CrA80KV 13 sztuk.

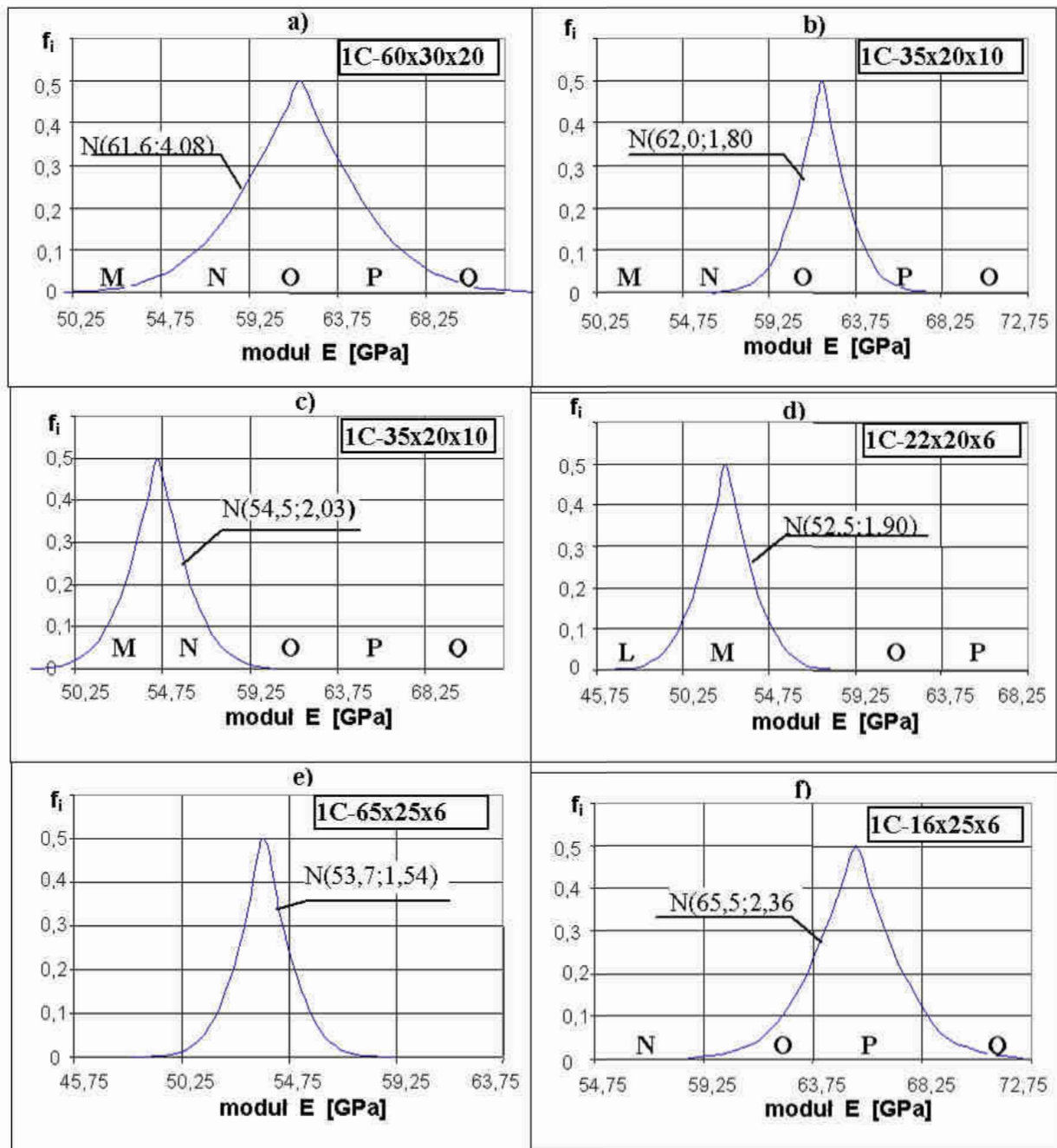
Ściernice te zostały zdiagnozowane metodą akustyczną średniej częstotliwości. Na podstawie uzyskanych wyników wyliczono wartość modułu E . Wielkości statystyczne, opisujące badany parametr, zestawiono w tab. XI.

Tab. XI. Wielkości statystyczne modułu E ściernic producentów zagranicznych

Tab. XI. Statistic quantities of modules E of imported grinding wheels

Parametr statystyczny	99A80KV (Włochy)		99A80KV (Czechy)		CrA80KV (Austria)	
	60x30x20	35x20x10	35x20x10	22x20x6	65x32x20	16x25x6
\bar{E} [GPa]	61,8	62,0	54,5	52,5	53,7	65,5
σ_n [GPa]	3,97	1,75	1,98	1,85	1,5	2,30
σ_{n-1} [GPa]	4,08	1,80	2,03	1,90	1,54	2,36
$v = \sigma_{n-1} / \bar{E}$	0,066	0,029	0,037	0,036	0,029	0,036
$6\sigma_{n-1}$ [GPa]	24,50	10,80	12,18	11,40	9,24	14,17

Z uzyskanych danych wynika, że badane partie ściernic różnych producentów, mimo porównywalnej charakterystyki technicznej, różnią się między sobą zarówno w zakresie miary (\bar{E}), jak i miary rozproszenia wyników, opisywanej odchyleniem standardowym σ_n . Zmienność ta występuje pomiędzy partiami narzędzi tego samego producenta oraz w odniesieniu do wyrobów innego producenta, w każdym jednak przypadku można ją opisywać rozkładem normalnym ($v < 0,33$). Graficzne obrazy tych rozkładów pokazano na rys. 94.



Rys. 94. Rozkłady modułu E ściernic ceramicznych producentów zagranicznych:

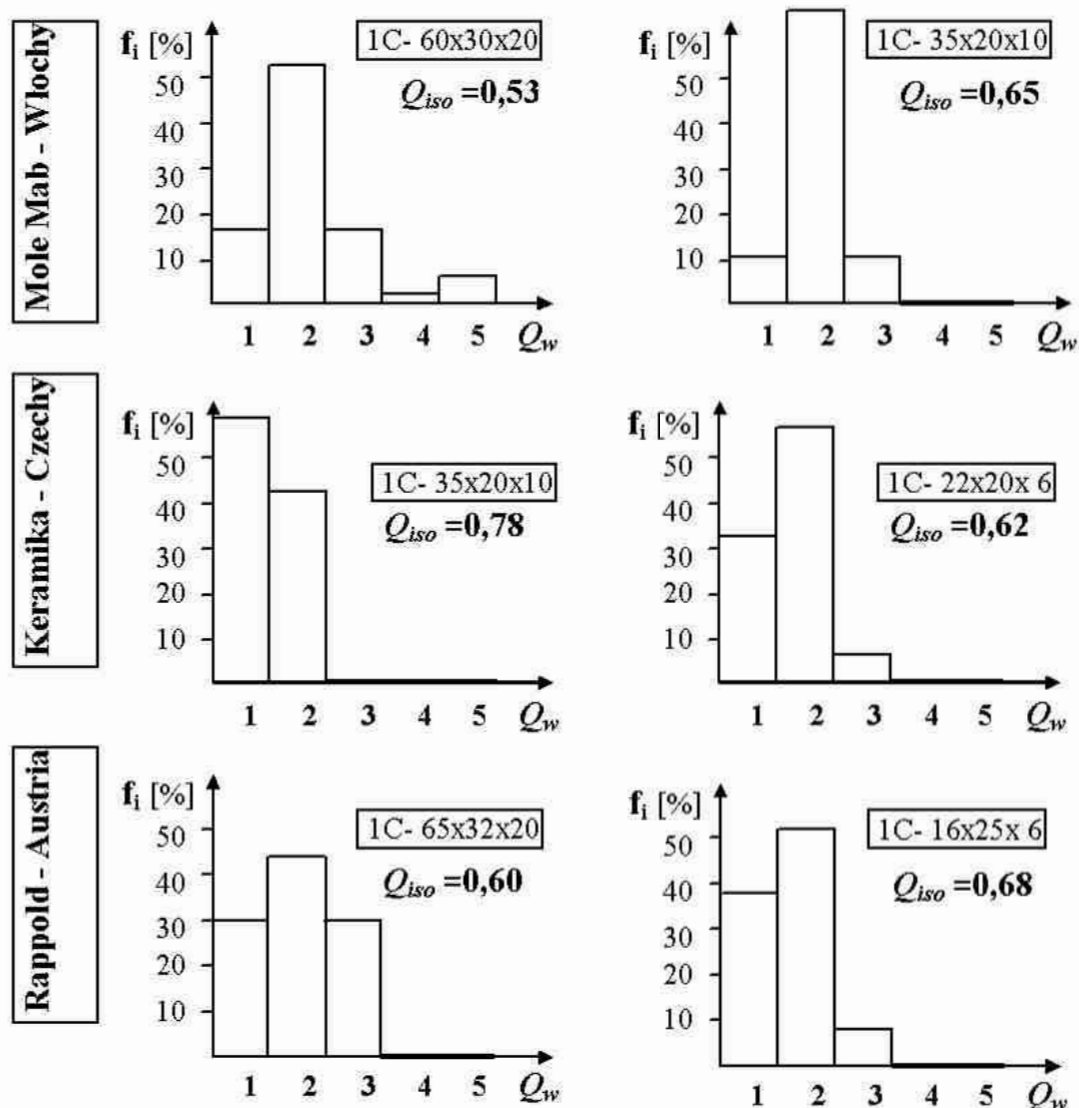
a,b) Mole Mab – Włochy; c,d) Keamika – Czechy; e,f) Rappold – Austria

Fig. 94. Distributions of the modulus E in imported grinding wheels: a,b) made by Mole Mab – Italy; c,d) made by Keamika – the Czech Republic; e,f) made by Rappold – Austria

Tak niejednorodne postacie rozkładów modułu E potwierdzają postawiony wcześniej wniosek o losowej naturze procesu wytwarzania ściernic ceramicznych i niewielkich możliwościach jego sterowania. Dla każdej badanej partii ściernic producentów zagranicznych rozproszenie wyników zmiennej E , opisywane wartością $6\sigma_{n-1}$, jest większe niż miało to miejsce w przypadku producentów krajowych. Największa niejednorodność badanego parametru występuje dla partii ściernic produkowanych przez firmę Mole Mab z Włoch: od 2 do 5 klas wg

E -skali. Najbardziej jednorodne względem modułu E są ściernice produkowane przez firmę Keramika z Czech. Ściernice producenta z Włoch charakteryzują się ponadto znacznie większymi wartościami średnimi modułu E w stosunku do ściernic innych producentów (mimo jednakowej charakterystyki technicznej).

Na podstawie powyższych rozkładów obliczono udziały procentowe ściernic w poszczególnych klasach jakości wykonania Q_w oraz syntetyczny wskaźnik zdolności jakościowej procesu Q_{ISO} . Przedstawiono je graficznie na rys. 95.



Rys. 95. Histogramy jakości wykonania ściernic producentów zagranicznych
Fig. 95. Bar charts of imported grinding wheel quality

Tak jak można było przypuszczać, najlepszą jakością wykonania charakteryzują się partie ściernic produkowane w firmie Keramika (Czechy), a najmniej w firmie Mole Mab (Włochy). W przypadku tego pierwszego producenta prawie cała partia ściernic posiada jakość ponadnormatywną (1klasa) i normatywną (2 klasa). Natomiast partie ściernic producenta z Włoch oraz z Austrii

zawierają także grupę narzędzi normatywnie umiarkowanej jakości (3 klasa), a w przypadku ściernic o wymiarach 60x30x20, produkowanych w firmie Mole Mab, znajduje się także grupa narzędzi (8%) o pozanormatywnej jakości wykonania (5 klasa).

Porównano wskaźniki zdolności jakościowej procesu Q_{ISO} dla badanych ściernic producentów krajowych i zagranicznych. Przeprowadzona analiza statystyczna metodą bloków kompletnie zrandomizowanych wykazała, że z 5-procentowym ryzykiem popełnienia błędu występujące różnice w zdolności jakościowej procesów wytwarzania narzędzi ściernych przez różnych producentów są statystycznie nieistotne. Upoważnia to do postawienia trzech generalnych wniosków:

1. Zdolność jakościowa procesów wytwarzania ściernic ceramicznych o konwencjonalnej budowie producentów krajowych i zagranicznych jest porównywalna.
2. Niezależnie od producenta (krajowy, zagraniczny) oraz warunków procesu (przemysłowy, laboratoryjny) partia ściernic ceramicznych charakteryzuje się rozrzutem modułu E rzędu 1–2 klas według E -skali. Jest on spowodowany samą naturą procesu wytwarzania tych narzędzi i praktycznie nie jest sterowalny przez producenta.
3. W tym samym procesie eksploatacyjnym nie należy łączyć ze sobą ściernic podchodzących od różnych producentów (mimo jednakowej ich charakterystyki), ponieważ posiadają one różne własności mechaniczne, będące skutkiem oddziaływania innego układu przyczyn specjalnych (związanych z doborem składników budowy) oraz systemowych (związanych warunkami procesu wytwarzania tych narzędzi).

4.4. Zastosowanie modułu E do statystycznego sterowania procesem

Wykazano, że moduł E jest liczbowym parametrem systemowej budowy ściernic ceramicznych, ujmującym wpływ zmiennych czynników związanych z samym narzędziem oraz procesem jego wytwarzania. Istnieje więc możliwość wykorzystania go nie tylko do analizy jakości wykonania narzędzi, ale także do badania zdolności jakościowej procesu i jego sterowania.

Przyjmuje się, że „zdolność jakościowa procesu” jest jednym z podstawowych parametrów opisu „wydolności” procesu [44], lub jego „poprawności” [20]. Zdolność tę, zgodnie z normą terminologiczną PN-ISO 3534-2, określa się według wartości wskaźnika C_p . Wskaźnik ten podaje, ile razy przedział naturalnej zmienności badanej cechy mieści się w jej polu tolerancji:

$$C_p = \frac{GLT - DLT}{6\sigma} = \frac{T}{6\sigma} \quad (84)$$

Całkowite pole tolerancji (T) jest różnicą pomiędzy granicą górną (GLT) a dolną (DLT) i wynika ze specyfikacji technicznej dla danego wyrobu.

Całkowite pole zmienności badanej cechy, opisywane wartością odchylenia standardowego σ poszczególnych realizacji, wynika z przyjęcia do analizy rozkładu normalnego oraz 99,73% poziomu ufności, dającego wartości graniczne $\pm 3\sigma$. Przyjmuje się przy tym, że proces jest pod kontrolą statystyczną, tzn. jest zdolny do produkowania dobrych jakościowo wyrobów, jeżeli $C_p \geq 1,33$. Prawdopodobieństwo wyjścia badanej cechy poza dopuszczalne granice wynosi bowiem w tym przypadku poniżej 0,00002. Wskaźnik C_p określa więc potencjalne możliwości procesu do spełnienia wymagań jakościowych.

Każdy proces produkcyjny jest specyficzną mieszaniną przyczyn: pospolitych (systemowych) i specjalnych. Podstawową sprawą jest umiejętność odróżniania tych dwóch grup, bowiem w stosunku do każdej z nich inne powinny być praktyczne działania kierownicze [74]. Oddzielenie jednej grupy przyczyn od drugiej jest możliwe przez statystyczną analizę wykresu kontrolnego procesu. O procesie produkcyjnym pozostającym pod kontrolą w sensie statystycznym mówi się, że jest zarówno stabilny, jak i prognozowalny [31]. Jest to taki proces, który nie wykazuje wartości nietypowych lub im podobnych oraz istnieje możliwość matematycznego obliczenia jego przyszłych wyników. Oznacza to, że z takiego procesu zostały usunięte przyczyny specjalne, a występujące rozrzuty poszczególnych realizacji wyrobu są wynikiem przyczyn systemowych (ujętych tolerancją). W takim przypadku nie należy dokonywać żadnych zmian w procesie, bowiem rozrzut ten jest naturą samego systemu. Jeśli natomiast nie można zaakceptować jego wielkości, to należy zidentyfikować niektóre z tych przyczyn, poddać je kontroli i zmienić proces tak, aby był realizowany w warunkach innego systemu [16]. Jest to taki proces, który nie wykazuje wartości nietypowych lub im podobnych, oraz istnieje możliwość matematycznego obliczenia jego przyszłych wyników.

Chcąc zweryfikować możliwość stosowania modułu E do sterowania jakością procesów produkcji narzędzi ściernych, dokonano badań tego parametru dla 30 kolejno wytwarzanych partii ściernic o jednakowej charakterystyce: 1C-600x63x305/38A180L9VBE(B5) w FMiWŚ KORUND w Kole. Przeciętne wartości modułu \bar{E} tych ściernic zestawiono w tab. XII.

Tab. XII. Wartości modułu \bar{E} 30 partii ściernic w kolejności produkcyjnej

Tab. XII. Values of the modulus \bar{E} 30 of a grinding wheel batch in manufacturing sequence

Lp.	\bar{E} [GPa]	Lp.	\bar{E} [GPa]	Lp.	\bar{E} [GPa]	Lp.	\bar{E} [GPa]	Lp.	\bar{E} [GPa]	Lp.	\bar{E} [GPa]
1	47,50	6	48,20	11	46,43	16	43,89	21	46,12	26	46,35
2	46,75	7	45,63	12	48,20	17	45,50	22	45,57	27	47,95
3	44,66	8	45,84	13	48,82	18	45,65	23	44,55	28	46,00
4	47,63	9	49,80	14	45,37	19	45,40	24	46,47	29	46,47
5	45,55	10	47,00	15	44,95	20	46,00	25	46,62	30	48,30

Do kontroli nad zmiennością, a także do identyfikacji i kontroli przyczyn, które powodują wzrost tej zmienności, stosuje się karty kontrolne, przy czym najczęściej i najszerzej stosowaną kartą przy liczbowej ocenie właściwości produktu jest karta kontrolna „wartości średniej” [16].

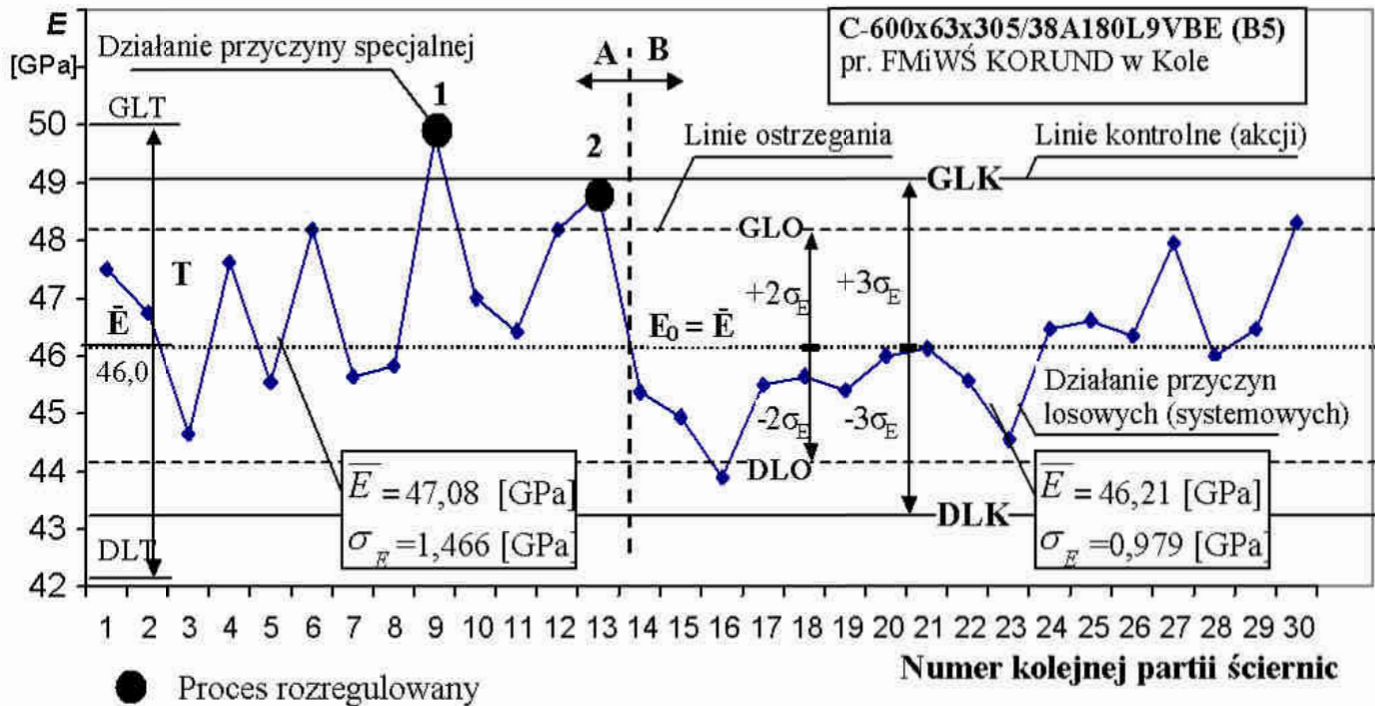
Tego rodzaju kartę można zastosować, gdy zmienna diagnostyczna (X) jest zmienną losową o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa, a odchylenie standardowe tej zmiennej (σ) jest stałe (przynajmniej w krótkich przedziałach czasu) i znane [44]. Warunki te dla badanego procesu są spełniane, bowiem przykładowo: wartość średnia modułu E dla ściernic z badanej partii nr 6 wynosi $\bar{E} = 47,6$ GPa, a odchylenie standardowe $\sigma_n = 1,49$ GPa [120]. Różnice tego parametru w 29 pozostałych partiach ściernic nie były większe niż 0,414 GPa, można więc przyjąć, że badany proces jest stabilny pod względem przyczyn systemowych. Ponieważ współczynnik zmienności $v = \sigma_n/\bar{E}$ jest dużo mniejszy niż 0,33, oznacza to że rozrzut badanej zmiennej E może być opisany rozkładem normalnym.

Do budowy karty kontrolnej procesu zastosowano „metodę projektową”, czyli wykorzystano dane normatywne dotyczące tolerancji modułu E podanej w technologii wykonania ściernic o tej charakterystyce u danego producenta. Tolerancja ta została określona warunkiem: $E = 46 \pm 4$ GPa. Dawało to granicę górną $GLT = 50$ GPa i dolną $DLT = 42$ GPa. Ponieważ budowana karta procesu jest kartą torów wartości średnich badanego parametru, położenie linii centralnej E_o wyznaczono z wartości średniej, tj. $E_o = \bar{E} = 46$ GPa. Odchylenie standardowe wartości średniej σ_E wyznaczono z przekształcenia wzoru (84), przyjmując zalecaną wartość wskaźnika $C_p = 1,33$. Z takiego działania $\sigma_E = 1$ GPa. Dla tych wartości wyznaczono położenie linii kontrolnych:

- górnej (GLK) i dolnej (DLK) linii kontrolnej z warunku: $\bar{E}_o \pm 3\sigma_E$,
- górnej (GLO) i dolnej (DLO) linii ostrzegania z warunku: $\bar{E}_o \pm 2\sigma_E$.

Zostały one naniesione na wykres kontrolny, obrazujący losową zmienność przeciętnych wartości modułu E dla 30 partii badanych ściernic w takiej kolej-

ności, jak przebiegała ich produkcja. Wykres ten przedstawiono na poglądowej karcie kontrolnej SPC dla tego procesu – rys. 96.



Rys. 96. Poglądowa karta kontrolna SPC dla badanego procesu produkcyjnego
Fig. 96. Sample control chart SPC for manufacturing process being examined

Z takiego zestawienia można poczynić obserwacje dotyczące oddziaływania przyczyn szczególnych na proces. Lokalizacja punktów pomiarowych \bar{E} wewnątrz linii kontrolnych (GLK) i (DLK) oznacza, że nie ma oddziaływania takich przyczyn, a występujące różnice są losowe i pochodzą od przyczyn systemowych. Jeżeli można zaakceptować zmienność wynikającą z przyczyn systemowych, to nie powinno się ingerować w system, bowiem realizowany proces jest statystycznie stabilny i stosowanie działań korygujących nie przyniesie istotnej poprawy. Wykrycie na karcie kontrolnej symptomu rozregulowania się procesu (p. 1 lub p. 2) wskazuje na to, że w tych miejscach oddziałuje jakaś przyczyna szczególna (zakłócenie), o nieprzewidzianym podczas projektowania charakterze, powodująca utratę założonych parametrów wytwarzanego wyrobu. „Czarny punkt” oznacza, że proces jest rozregulowany. Aby podnieść jego zdolność do wytwarzania wyrobów dobrych jakościowo (w świetle przyjętego kryterium), należałoby wykryć przyczyny tych odchyłeń i zlikwidować je. Kryteria oceny rozregulowania się procesu wynikają więc z właściwości tego procesu, a nie z dopuszczalnych przez technologa odchyłeń wartości badanego parametru.

Z karty tej wynika, że badany proces mógł być pod kontrolą statystyczną, bowiem po wystąpieniu niepożądanych wartości (oznaczonych czarnym punktem) kolejne partie wyrobów były „przesterowywane” w kierunku przeciwnym

do występującego trendu. Pierwsza wprowadzona zmiana (po p. 1) nie przyniosła jeszcze trwałych efektów i dopiero druga (po p. 2) skutecznie usunęła działanie przyczyn specjalnych, bowiem wartości średnie badanego parametru znalazły się na trwale wewnątrz linii kontrolnych.

Na wykresie kontrolnym badanego procesu, z rys. 96, można więc wyróżnić dwa pola (oznaczone tu jako A,B):

- A (*przed korektą*) – proces niewydolny $C_p = 0,9$;
- B (*po korekcie*) – proces wydolny $C_p = 1,36$.

Usunięcie szczególnej przyczyny zmienności, którą mogła być np. zbyt wysoka temperatura wypalania, przyniosło więc korzystną zmianę zdatności procesu. Wartość średnia \bar{E} zbliżyła się do wartości nominalnej, a odchylenie standardowe σ_E osiągnęło mniejszą wartość, co jest korzystne dla zdolności jakościowej rozpatrywanego procesu.

Jeżeli badany proces nie byłby sterowany statystycznie, to przy liczbie występujących niezgodności $n = 2$, ze stosunku do wszystkich realizacji ($N = 30$) można wyliczyć jego zdolność jakościową. Wynosiłaby ona 0,9333.

Jeżeli proces ten poddano kontroli statystycznej (na podstawie badania ściernic metodą akustyczną i wyznaczania modułu E) to jego zdolność jakościowa wzrosła do poziomu nie mniejszego niż 0,9964. Można sądzić, że taki poziom zdolności jakościowej procesu satysfakcjonował zarówno producenta, jak i potencjalnego odbiorcę ściernic wytwarzanych w tym procesie.

ROZDZIAŁ 5

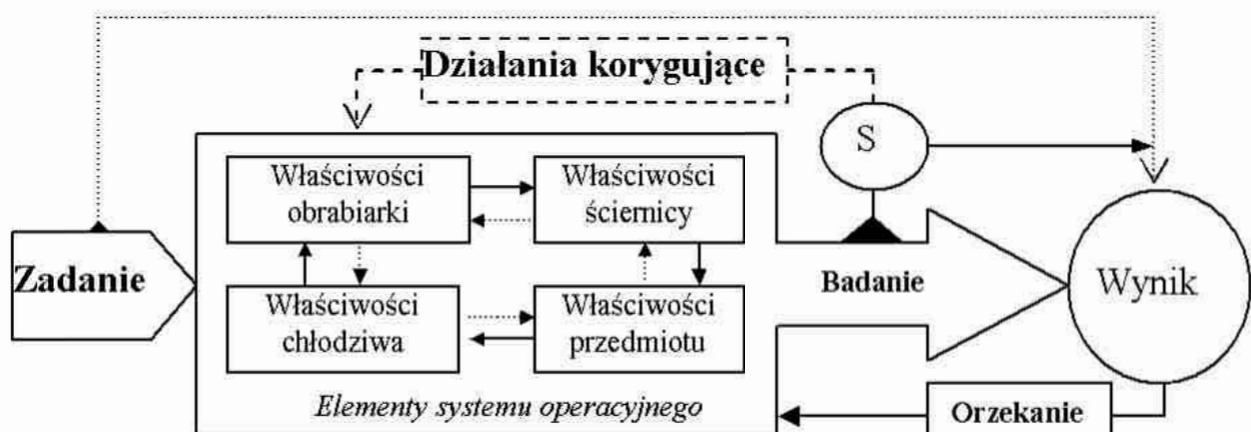
OCENA JAKOŚCI UŻYTKOWEJ ŚCIERNIC

Podstawową właściwością każdego środka technicznego jest jego gotowość techniczna, charakteryzująca zdolność do spełnienia wymagań. Miarą tej właściwości jest prawdopodobieństwo tego, że środek ten w określonej chwili będzie się charakteryzował określonym zbiorem cech technicznych i użytkowych, umożliwiających skuteczne wykonanie postawionego zadania. W odniesieniu do narzędzi ściernych zdatność ta wyznaczana jest badaniami jakości wykonania. Zakłada się więc, że narzędzie ścierne, spełniające określoną normę dotyczącą jakości wykonania Q_w , posiada użyteczność (zdolność) operacyjną. Pewność tego, że tak jest, można mieć jednak dopiero wówczas, gdy dane narzędzie zostanie użyte i wykona postawione zadanie.

5.1. System operacyjny do badań jakości użytkowej ściernic

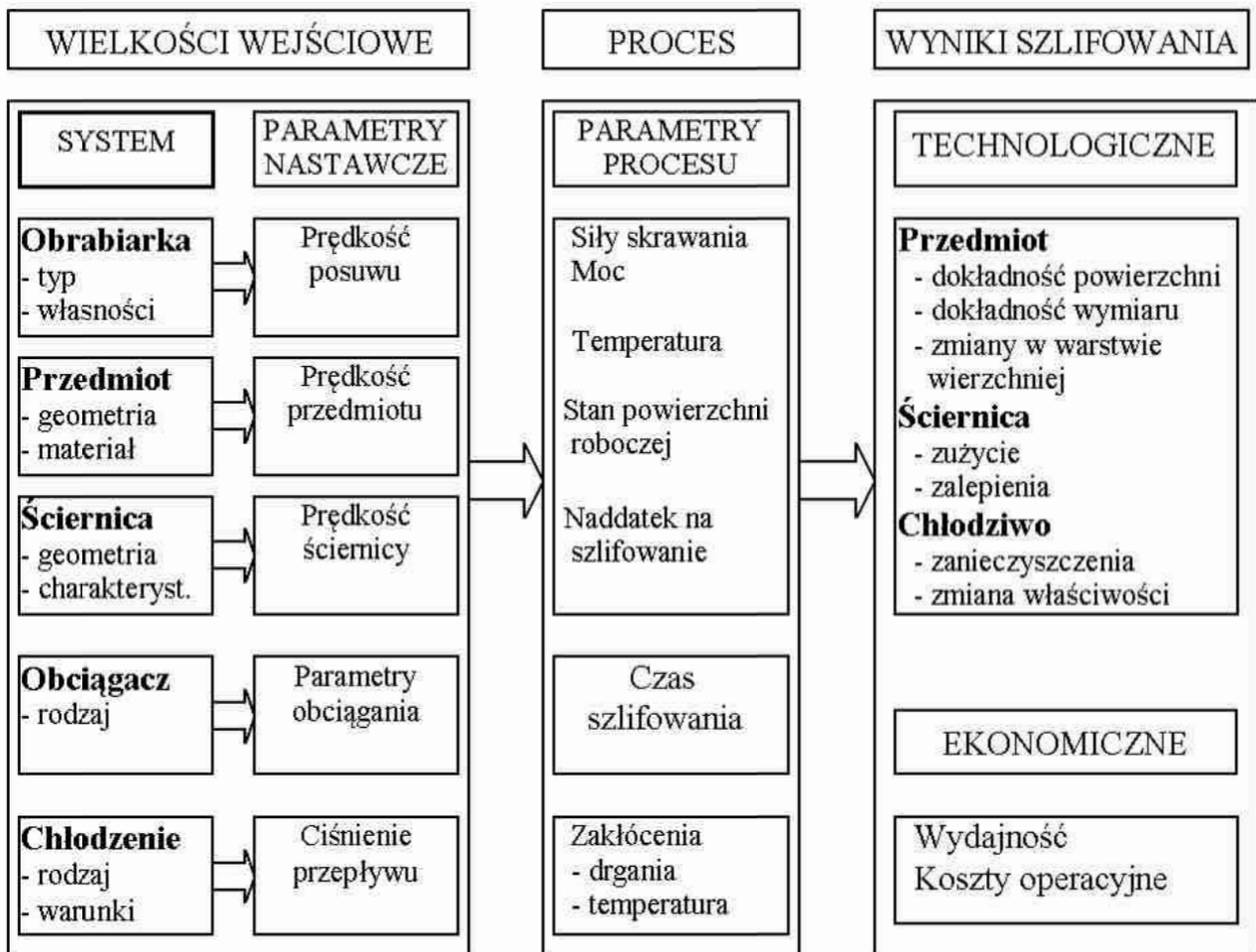
Przydatność użytkowa ściernicy, czyli jej jakość w podstawowym znaczeniu, zależy od zintegrowanego oddziaływania elementów tworzących system operacyjny **SO**. Istotną cechą systemów tworzących układ materialny jest bowiem to, że wzajemne powiązania elementów tego systemu mogą dodatnio lub ujemnie wpływać na działanie określonego elementu i tym samym współuczestniczyć w ustalaniu się jego właściwości użytkowych [146].

System operacyjny obróbki szlifowaniem charakteryzuje się właściwymi mu elementami, których zadaniem jest zamiana zadania na wyniki – rys. 97.



Rys. 97. Model powiązań w systemie operacyjnym obróbki szlifowaniem
Fig. 97. Model of connections in operating system for abrasive machining

Wyniki technologiczne i ekonomiczne uzyskiwane z tego systemu nie zależą od liczby i rodzaju współpracujących elementów, ale od ich właściwości – rys. 98.



Rys. 98. Charakterystyka elementów systemu obróbki szlifowaniem [153]

Fig. 98. Characteristics of system elements of abrasive machining [153]

Określona współzależność funkcjonalna tych właściwości daje w efekcie bardziej lub mniej skuteczne osiągnięcie celów postawionych przed tym systemem. Racjonalnym dążeniem jest „realizacja zgodna z intencją”. Intencje (projektowe) realizacje (wykonawcze) mogą się różnić, a powodem tego jest niedokładność wypełniania swoich funkcji przez elementy systemu. Takim najmniej dokładnym (najbardziej zawodnym) elementem każdego systemu operacyjnego jest człowiek. On wykazuje się bowiem w swoich działaniach najmniejszą powtarzalnością określonych czynności, wynikającą ze zmęczenia, zmęczenia i chęci zmniejszenia swego wysiłku. Stąd systemy operacyjne, których celem jest stabilność wyników, nadzorowane są nie przez człowieka, ale przez automat. Mając to na uwadze zdecydowano się prowadzić badania eksploatacyjne jakości użytkowej ściernic na obrabiarce zautomatyzowanej. Wykorzystano do tego celu półautomat szlifierski (firmy Nova), o mocy silnika napędu głównego 4 kW, sto-

sowany w linii obróbki pierścieni łożysk tocznych (typ 1208), w Fabryce Łożysk Tocznych w Kraśniku – rys. 99.



Rys. 99. Widok ogólny automatu szlifierskiego do badań eksploatacyjnych
Fig. 99. General view of an automatic grinding machine for operational testing

Zastosowany w tej obrabiarce zautomatyzowanego cyklu operacji szlifowania i obciągania ściernic pozwalał ujednoczyć warunki pracy badanych narzędzi. Próby badawcze prowadzono na typowych dla tej obrabiarki pierścieniach łożyskowych 1208 (rys. 100a) i ściernicach: 1C-35x20x10 (rys. 100b).



Pierścienie łożyskowe typ 1208



Ściernice małogabarytowe typ 1C-35x20x10

Rys. 100. Widok ogólny a) przedmiotów obrabianych, b) narzędzi ściernych
Fig. 100. General view of a) workpieces, b) abrasive tools

Podczas prób badawczych obróbkę pierścieni łożyskowych (o średnicy otworu $d_w = 41,65$ mm i szerokości $B = 18$ mm, wykonanych ze stali łożysko-

wej LH15 i zahartowanych do twardości 64 ± 2 HRC) prowadzono do momentu usunięcia założonego naddatku 0,4 mm, przy użyciu czujników do kontroli aktywnej.

Do badań przyjęto warunki obróbki zgodne z technologią przemysłową obróbki tego typu pierścieni łożyskowych, stosowaną w FLT Kraśnik.

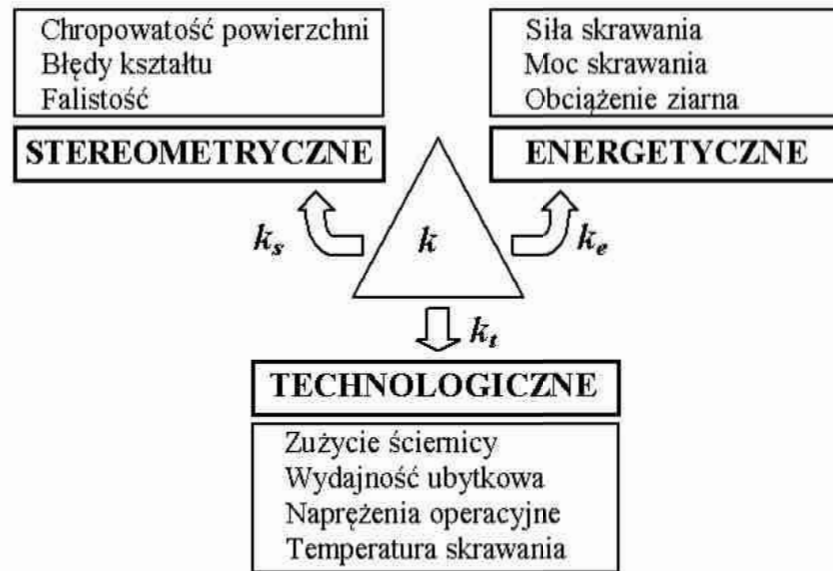
Ustalone parametry obróbki wymuszały ubytek materiału o objętości $V_w = 410 \text{ mm}^3$ w czasie (maszynowym) $t_m = 48 \text{ s}$. Stosowana była więc strategia eksploatacyjna według ilości wykonanej pracy. Tego typu postępowanie zalicza się do grupy normatywnych strategii eksploatacyjnych. Normą operacyjną dla każdej badanej ściernicy była więc wydajność ubytkowa $Q_w = 8,5 \text{ mm}^3/\text{s}$. Wydajność tę uzyskiwano przy standardowych parametrach obróbki dla danego typu obrabiarki: prędkość obwodowa ściernicy $v_s = 43 \text{ m/s}$, prędkość obwodowa przedmiotu $v_w = 0,13 \text{ m/s}$, styk wgłębny zgrubny $a_{pw} = 0,18 \text{ mm}$, styk wgłębny wykańczający $a_{pw} = 0,02 \text{ mm}$ (pomiędzy zabiegiem obróbki zgrubnej i wykańczającej nie stosowano obciążania ściernicy). Długość geometryczna styku ściernicy z przedmiotem wynosiła $l_g = 0,05 \text{ mm}$, a promień równoważny $r_{eg} = 100$. Obrabiarkę wyposażono dodatkowo w zestaw pomiarowy do badania zapotrzebowania mocy oraz system indywidualnego chłodzenia. Stosowano chłodzenie 2% olejem emulgującym (Cimtech D18), strumieniem mieszaniny doprowadzanym swobodnie.

W obróbce szlifowaniem wynik działania systemu operacyjnego (rys. 97) jest efektem określonych stanów technicznych użytego narzędzia. Stany te są badane na drodze odpowiednich pomiarów określonych symptomów S . Wartości tych symptomów świadczą o określonej jakości użytkowej tego narzędzia w świetle przyjętych kryteriów oceny. Na te kryteria nakładane są bowiem różne warunki graniczne, które pozwalają zwykle wydzielić co najmniej dwie klasy stanów jakościowych narzędzia: dobre (+) i złe (-).

Istotne jest tu podkreślenie, że tego typu diagnozowanie stanu jest bardziej działaniem umożliwiającym sterowanie niż ocenę efektywności danego narzędzia. Producenta łożysk w istocie rzeczy nie obchodzi, czy wielkości opisujące stan użytkowanego narzędzia na danej obrabiarce przekroczyły takie lub inne wielkości graniczne, istotne natomiast dla niego jest to, czy może uzyskać za pomocą tego narzędzia wymaganą dokładność wymiarowo-kształtową i chropowatość obrabianej powierzchni i jak można skrócić czas obróbki. W systemie operacyjnym obróbki szlifowaniem oprócz określonych miar efektywności narzędzia, dochodzi zatem jeszcze funkcja czasu. W przypadku realizowanych badań na automacie szlifierskim funkcja ta ma wartość stałą $t_m = 48 \text{ s}$, może być zatem pominięta przy ustalaniu wskaźników (kryteriów) do ocen porównawczych jakości użytkowej ściernic.

W procesach obróbki szlifowaniem jako jeden z podstawowych wskaźników oceny pracy narzędzia ściernego przyjmuje się zwykle wskaźnik szlifowania G , który jest stosunkiem ubytku materiału V_w do zużycia objętościowego ściernicy V_s w tym samym czasie (PN-92 M-01002/05). Jest to jednak wskaźnik powstały z określonych przeliczeń, wartości wynikowych procesu i przy stałej objętości V_m jest tylko pochodną zużycia ściernicy V_s .

Do wytypowania wskaźników, które mogły posłużyć jako miary (kryteria) oceny jakości użytkowej badanych ściernic, zastosowano przesłankę, że systemowa miara jakości winna być związana z różnymi grupami rodzajowymi systemu operacyjnego: narzędziem, obrabiarką oraz obrabianą powierzchnią. W tym kontekście wyróżnić można kryteria: technologiczne, energetyczne i stereometryczne – rys.101.



Rys. 101. Grupy rodzajowe kryteriów oceny jakości użytkowej narzędzi ściernych
Fig. 101. Type groups of criteria for functional quality assessment of abrasive tools

Jako miary jakości użytkowej Q_e badanych ściernic, przyjęto po jednym wskaźniku kryterialnym z każdej grupy rodzajowej:

- k_t (technologiczne) – promieniowe zużycie ściernicy; Δ_{rs} [mm],
- k_s (stereometryczne) – chropowatość powierzchni obrabianej; Ra [μm],
- k_e (energetyczne) – maksymalna moc skrawania P_c [kW].

W określonych zastosowaniach można posługiwać się poszczególnymi kryteriami oddzielnie, np. dla obróbki gładkościowej istotne są głównie kryteria związane z parametrami stereometrycznymi obrabianej powierzchni. Pełną informację o właściwościach użytkowych daje jednak wskaźnik syntetyczny, pozwalający wszechstronnie ocenić cechy użytkowe ściernicy.

W tym przypadku potrzebna jest pewna funkcja porządkująca, ponieważ stosowane kryteria oceny posiadają zwykle różne miana. Funkcja ta pozwala

wprowadzić wszystkie kryteria na jedną wspólną skalę. Najlepiej przy tym, żeby to była skala jakościowa 0–1. Postać takiej funkcji porządkującej W_i jest następująca [132]:

$$W_i = \frac{k_{zm} - k_{\min}}{k_{\max} - k_{\min}} \quad (85)$$

gdzie:

- W_i – wartość funkcji porządkującej dla i -tego parametru oceny,
- k_{zm} – wartość zmierzona i -tego parametru dla konkretnej ściernicy,
- k_{\max} – wartość maksymalna i -tego parametru dla wszystkich ściernic,
- k_{\min} – wartość minimalna i -tego parametru dla wszystkich ściernic.

Taka postać funkcji porządkującej jest właściwa dla kryterium traktowanego jako korzystne (+) dla danego procesu. Jeżeli jego wzrost nie jest korzystny dla przebiegu procesu, to funkcja porządkująca przyjmie postać:

$$M_i = 1 - W_i \quad (86)$$

Z sumowania i obliczenia wartości średniej funkcji porządkującej dla danego obiektu badań można ustalić poziom unormowanego wskaźnika Q_{ISO} oceny efektywności zastosowanych ściernic w danym systemie operacyjnym (przy czym s – liczba wziętych pod uwagę kryteriów oceny):

$$Q_{ISO} = \sum_{i=1}^s W_i(M_i) \quad (87)$$

W celu obliczenia tego wskaźnika Q'_{ISO} dla danej grupy ($l=1, 2, 3...p$) ściernic (np. przy ocenie narzędzi określonego producenta), należy dokonać sumowania:

$$Q'_{ISO} = \sum_{l=1}^p Q_{ISO} \quad (88)$$

Przy ocenie jakości eksploatacyjnej narzędzi użytkowanych w systemach zautomatyzowanej obróbki, gdzie występuje zróżnicowanie trwałości operacyjnej T , istotne staje się zagadnienie niezawodności, czyli zachowania zdolności użytkowych partii narzędzi, stosowanych w tym systemie, określonym czasie t_m . Jeżeli czas ten jest podany, to określenie niezawodności jest zadaniem diagnostycznym, które sprowadza się do wyznaczenia trwałości operacyjnej T_k ze względu na określone kryterium (k) oraz ustalenia rozkładu tej trwałości. Miarą niezawodności R , która jest właściwością kompleksową (całego systemu) i charakteryzuje poprawną pracę narzędzi w czasie t_m , jest prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia $T_k \geq t_m$ [19]. Prawdopodobieństwo to, w powiązaniu z modułem E (przyjmowanym jako parametr systemowej oceny jakości ściernic), określano metodą graficzną.

5.2. Ocena jakości użytkowej ściernic różnych producentów

W celu dokonania oceny jakości użytkowej Q_e ściernic, produkowanych przez rozpatrywanych producentów, pobrano próbki badawcze z każdej analizowanej partii narzędzi. Wszystkie ściernice były tego samego typu (1C-35x20x10) i miały jednakową (lub bardzo zbliżoną) charakterystykę techniczną (99A80J7V lub CrA80J7V). Do badań wybrano po 6 egzemplarzy z każdej partii. Wybrane ściernice poddano próbom eksploatacyjnym na omówionym wcześniej stanowisku badawczym. Czas maszynowy operacji wynosił $t_m = 48$ s. Dla każdej ściernicy wykonywano 3 próby. Podczas próby dokonywano pomiarów: zużycia promieniowego ściernicy Δ_{rs} , maksymalnej mocy skrawania P_c oraz chropowatości szlifowanej powierzchni Ra , przyjmowanych dalej jako kryteria oceny jakościowej. Otrzymane wyniki uśredniano i zamieszczano w odpowiednich tablicach danych (XIII, XIV, XV). Podano w nich także wyliczoną intensywność zużycia ściernicy Q_s [mm^3/s]. W tablicy XIII podano wyniki badań ściernic producentów zagranicznych (oznaczenia: MM – Mole Mab Włochy, KER – Keramika Czechy, RAP – Rappold Austria), a w tab. XIV ujęto wyniki badań ściernic z produkcji firmy Inter Diament w Grodzisku Maz.

Tab. XIII. Wskaźniki jakości użytkowej ściernic producentów zagranicznych

Tab. XIII. Functional quality coefficients of imported grinding wheels

Typ spoiwa	Nr ściernicy	E [GPa]	Δ_{rs} [mm]	Q_s [mm^3/s]	$P_{c\ max}$ [kW]	Ra [μm]
MM	M1	61,0	0,025	1,15	3,64	0,65
	M2	64,0	0,018	0,83	3,30	0,51
	M3	61,0	0,015	0,69	2,60	0,65
	M4	64,0	0,012	0,55	3,32	0,49
	M5	61,0	0,020	0,92	2,52	0,88
	M6	64,0	0,020	0,92	2,76	0,70
KER	K1	53,0	0,018	0,83	2,92	0,51
	K2	55,0	0,030	1,38	2,78	0,66
	K3	52,0	0,030	1,38	2,76	0,67
	K4	55,0	0,017	0,78	3,24	0,57
	K5	52,0	0,040	1,84	2,22	0,75
	K6	55,0	0,045	2,07	2,22	0,57
RAP	R1	44,5	0,035	1,61	2,70	0,90
	R2	43,6	0,030	1,38	2,40	0,97
	R3	43,0	0,035	1,61	2,46	0,44
	R4	45,1	0,030	1,38	2,46	0,50
	R5	44,5	0,035	1,61	2,46	0,74
	R6	45,0	0,040	1,84	2,52	0,76

Tab. XIV. Wskaźniki jakości użytkowej ściernic z produkcji przemysłowej**Tab. XIV.** Functional quality coefficients of commercial grinding wheels

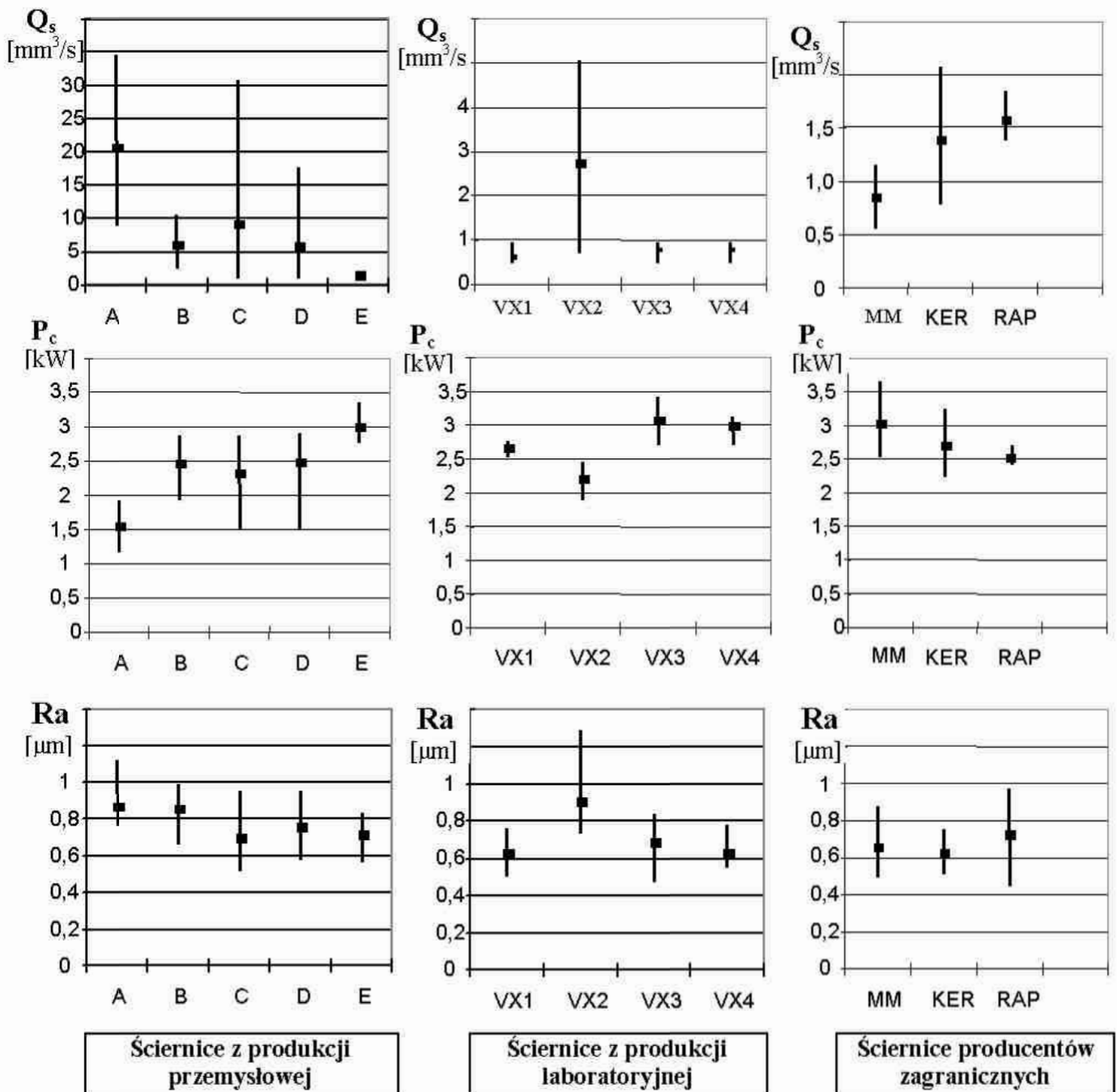
Typ spoiwa	Nr ściernicy	E [GPa]	Δ_{rs} [mm]	Q_s [mm ³ /s]	$P_{c\ max}$ [kW]	Ra [μm]
A	A70	32,0	0,75	34,66	1,34	0,76
	A34	38,0	0,51	23,46	1,32	1,04
	A94	40,0	0,52	23,92	1,16	1,12
	A3	42,6	0,33	15,18	1,68	0,89
	A28	43,0	0,19	8,76	1,76	1,07
	A49	43,2	0,37	17,02	1,92	0,90
B	B96	40,0	0,22	10,12	2,04	0,96
	B80	42,0	0,23	10,58	1,92	0,90
	B12	44,0	0,12	5,52	2,72	0,93
	B94	46,0	0,05	2,3	2,88	0,67
	B29	47,0	0,10	4,6	2,58	0,99
	B92	48,0	0,05	2,3	2,58	0,66
C	C78	40,0	0,67	30,82	1,48	0,74
	C52	42,0	0,23	10,58	2,20	0,95
	C06	44,0	0,15	6,9	2,26	0,80
	C47	46,0	0,08	3,68	2,58	0,61
	C92	48,0	0,03	1,38	2,88	0,51
	C69	50,0	0,02	0,92	2,36	0,54
D	D39	40,0	0,385	17,71	1,50	0,95
	D18	42,0	0,08	3,68	2,44	0,90
	D86	44,0	0,148	6,80	2,48	0,75
	D13	46,0	0,068	3,13	2,66	0,57
	D51	48,0	0,045	2,07	2,84	0,76
	D35	50,0	0,02	0,92	2,90	0,58
E	E19	44,0	0,04	1,84	2,90	0,74
	E46	45,0	0,04	1,84	2,84	0,83
	E67	46,0	0,037	1,70	2,76	0,76
	E07	47,0	0,02	0,92	2,86	0,61
	E03	48,0	0,017	0,78	3,36	0,78
	E90	50,0	0,015	0,69	3,16	0,56

Wartości dotyczące wskaźników oceny jakości użytkowej ściernic z produkcji laboratoryjnej, na Wydziale Chemii Nieorganicznej Politechniki Gdańskiej, przedstawiono w tablicy XV.

Tab. XV. Wskaźniki jakości użytkowej ściernic z produkcji laboratoryjnej
Tab. XV. Functional quality coefficients of laboratory made grinding wheels

Typ spoiwa	Nr ściernicy	E [GPa]	Δ_{rs} [mm]	Q_s [mm ³ /s]	$P_{c\ max}$ [kW]	Ra [μm]
VX1	1.1	55,2	0,010	0,46	2,64	0,76
	1.2	50,8	0,010	0,46	2,52	0,63
	1.3	53,7	0,020	0,92	2,76	0,65
	1.4	52,3	0,015	0,69	2,70	0,63
	1.5	52,3	0,010	0,46	2,58	0,50
	1.6	54,3	0,015	0,69	2,64	0,57
VX2	1.1	41,6	0,045	2,07	1,88	0,81
	1.2	40,1	0,110	5,06	2,32	1,29
	1.3	42,3	0,057	2,62	2,32	0,77
	1.4	42,5	0,052	2,39	2,16	0,73
	1.5	40,9	0,075	3,45	2,46	0,89
	1.6	40,0	0,015	0,69	2,04	0,92
VX3	1.1	55,7	0,010	0,46	3,00	0,84
	1.2	52,0	0,015	0,69	2,70	0,65
	1.3	49,0	0,015	0,69	3,06	0,84
	1.4	55,2	0,015	0,69	3,24	0,65
	1.5	58,3	0,020	0,92	3,42	0,47
	1.6	57,8	0,010	0,46	2,94	0,65
VX4	1.1	59,3	0,010	0,46	3,12	0,78
	1.2	59,3	0,020	0,92	2,70	0,55
	1.3	59,2	0,015	0,69	3,00	0,55
	1.4	59,3	0,015	0,69	3,12	0,66
	1.5	58,0	0,020	0,92	3,12	0,55
	1.6	59,0	0,020	0,92	2,82	0,61

Na podstawie uzyskanych danych obliczono zmienność analizowanych wskaźników oceny jakościowej badanych ściernic, opisywaną rozstępem R . Wartości te przedstawiono na wykresach z rys. 102, na których zaznaczono także wartości średnie analizowanych wskaźników. Wynika z nich, że porównywalną intensywnością zużycia Q_s charakteryzują się ściernice producentów zagranicznych oraz produkowane w warunkach laboratoryjnych (za wyjątkiem produkowanych przy układzie parametrów procesu wytwarzania oznaczonych jako VX2). Ze ściernic produkowanych przemysłowo porównywalnym zużyciem charakteryzują się tylko ściernice wykonywane ze spoiwa oznaczonego jako E. Intensywność zużycia ściernic ze spoiw: A, B, C, D, jest o rząd większa od pozostałych. Oznacza to, że skład tych spoiw nie jest właściwy dla ściernic pracujących w warunkach dużych obciążeń.



Rys. 102. Rozstęp wskaźników oceny jakościowej ściernic różnych producentów

Fig. 102. Scatter of functional quality coefficients of grinding wheels made by different manufacturers

Z porównania maksymalnej mocy skrawania P_c wynika, że te partie ściernic, które charakteryzowały się większą intensywnością zużycia Q_s , wykazywały się mniejszym zapotrzebowaniem mocy na skrawanie. Było to spowodowane większym samoostrzeniem się tych ściernic. Największą moc skrawania wykazują ściernice produkcji Mole Mab z Włoch. Można było tego oczekiwać, bowiem charakteryzowały się one największą twardością według modułu E .

Mechanizm powiązania zjawisk makroskopowych (zużycie ściernic, pobór mocy) ze zjawiskami mikroskopowymi procesu szlifowania (zmiany na ziar-

nach ściernych) potwierdza się także w odniesieniu do chropowatości powierzchni szlifowanej badanymi ściernicami. W tych przypadkach, kiedy proces samoostrzenia jest bardziej nasilony (wykrusza się więcej ziaren ściernych) zaobserwować można większą chropowatość szlifowanej powierzchni, przy czym w zakresie tego parametru występuje duży udział innych czynników losowych, zmieniających obraz badanych zjawisk. Można więc postawić wniosek, że chropowatość szlifowanej powierzchni jest mało czułym wskaźnikiem do szybkiej oceny jakości użytkowej ściernic.

Przeprowadzona analiza statystyczna otrzymanych wyników badań eksploatacyjnych ściernic różnych producentów wykazała, że przy 5% ryzyku popełnienia błędu istnieją różnice statystycznie istotne w zakresie intensywności zużycia Q_s tych narzędzi (wartość funkcji Snedecora $F_{ob} = 6,22 > F_{0,05} = 2,87$) i mocy skrawania P_c ($F_{ob} = 3,3 > F_{0,05} = 2,87$). Występujące różnice w zakresie chropowatości powierzchni szlifowanej badanymi ściernicami są przy tym poziomie ufności statystycznie nieistotne ($F_{ob} = 0,805 < F_{0,05} = 2,87$). Czynnikiem determinującym jakość użytkową tych narzędzi jest więc różna intensywność samoostrzenia się, wynikająca z różnej twardości, pochodzącej z samego recepturowania (np. ściernice firmy Mole Mab), jak i z oddziaływania przyczyn losowych w procesie wytwarzania. Zbadano (dla ściernic z produkcji przemysłowej), że wpływ zmian twardości (wynikających z oddziaływania przyczyn losowych) na intensywność zużycia Q_s jest już istotny przy 1% ryzyku popełnienia błędu ($F_{ob} = 13,87 > F_{0,01} = 4,43$).

W wyniku opracowania statystycznego zbiorów badanych ściernic z produkcji przemysłowej można podzielić na dwie grupy: a) ściernice o twardości J2 (według E -skali), podlegające intensywnemu procesowi samoostrzenia się (za „miękkie” do danej operacji) oraz wszystkie pozostałe (o twardości większej od J2), pracujące w zakresie ograniczonego samoostrzenia się. W ramach tej drugiej grupy różnice statystycznie istotne w intensywności zużycia Q_s występują dopiero przy zmianie modułu E rzędu 6 GPa, czyli więcej niż o 1 klasę twardości. Można więc postawić tu wniosek ogólny, że jeżeli charakterystyka ściernic jest dobrze dobrana do danych warunków obróbki, to zmiany w ramach 1 klasy twardości (wg E -skali) nie wpływają w sposób istotny na charakter ich pracy oraz intensywność zużycia. W świetle danych z rys.102 ocena jakości użytkowej badanych ściernic według pojedynczych wskaźników byłaby niepełna, dlatego też postuluje się, że ocenę potencjału użytkowego ściernic winno się prowadzić przy użyciu wskaźników syntetycznych [149].

W obróbce ściernic jako podstawowego wskaźnika procesu używa się wskaźnika szlifowania G , będącego odniesieniem ilości zeszlifowanego materiału do ilości utraconej w tym samym czasie objętości ściernicy. Wyliczoną wartość tego wskaźnika dla badanych ściernic podano w tab. XVI.

Tab. XVI. Wartości średnie wskaźników jakości użytkowej badanych ściernic

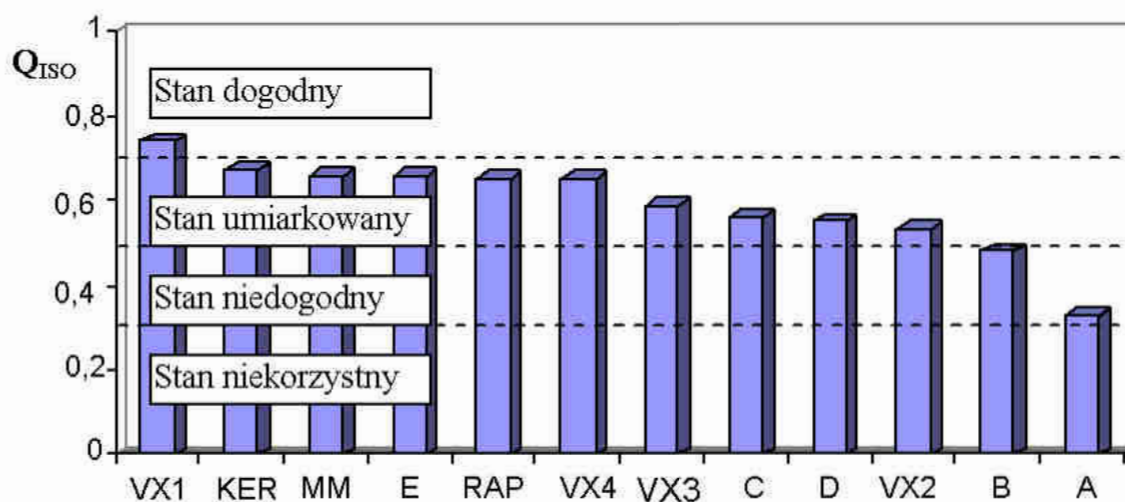
Tab. XVI. Average values of functional quality coefficients of grinding wheels being tested

Producent	Oznaczenie ściernic	$\overline{\Delta}_{rs}$ [mm]	\overline{P}_c [kW]	\overline{Ra} [μm]	\overline{G}
Inter Diament	A	0,440	1,53	0,96	932
	B	0,130	2,45	0,85	3.153
	C	0,195	2,46	0,69	2.102
	D	0,140	2,47	0,75	2.929
	E	0,030	2,48	0,71	13.667
PG Gdańsk	VX1	0,013	2,64	0,62	31.538
	VX2	0,081	2,20	0,90	5.061
	VX3	0,014	3,06	0,68	29.285
	VX4	0,017	2,98	0,62	24117
MoleMab	MM	0,025	3,22	0,54	16.400
Rappold	RAP	0,034	2,50	0,72	12.059
Keramika	KER	0,030	2,93	0,60	13.667

Z porównania wskaźnika G wynika, że największą użytecznością, do danej operacji obróbkowej, charakteryzują się ściernice wytwarzane w warunkach laboratoryjnych w Politechnice Gdańskiej, szczególnie ze spoiwa VX1. Ściernice o tym oznaczeniu pod względem wskaźnika G przewyższają narzędzia innych producentów od 3 do 33 razy. Według wskaźnika G najmniejszą przydatność użytkową do danej operacji wykazują ściernice z produkcji przemysłowej, wykonane ze spoiwa oznaczonego jako A. Można było tego oczekiwać analizując dane dotyczące zużycia Q_s na rys. 102. Przy stałej objętości zeszlifowanego materiału (tak jak ma to miejsce w realizowanej operacji) wyliczona wartość G opiera się bowiem tylko na jednym wskaźniku kryterialnym (zużycie Q_s). Do pełnej oceny jakościowej celowe jest uwzględnienie także i pozostałych wskaźników kryterialnych danego procesu (P_c oraz Ra). Ponieważ jednak wskaźniki te wyrażane są w różnych mianach, należy je najpierw sprowadzić na jedną wspólną skalę, za pomocą określonej funkcji porządkującej. W tym celu wykorzystano funkcję porządkującą W_i , opisaną wzorem (85). Wartości tej funkcji, wyliczone dla poszczególnych wskaźników kryterialnych ($k_1 = \overline{Ra}$, $k_2 = \overline{P}_c$ i $k_3 = \overline{\Delta}_{rs}$) zestawiono w tab. XVII. Na podstawie tych danych wyliczono wartość unormowaną syntetycznego wskaźnika oceny jakości użytkowej Q_{ISO} badanych ściernic, jako średnią arytmetyczną z tych trzech wskaźników. Wyliczone wartości Q_{ISO} zamieszczono w tab. XVII, a ich graficzny obraz pokazano na rys.103.

Tab. XVII. Wartości funkcji porządkującej W_i wskaźników eksploatacyjnych**Tab. XVII.** Values of the ordering function W_i for operational coefficients

Producent	Oznaczenie ściernic	W_{Ra}	W_{Pc}	W_{Δ}	Q_{ISO}
Inter Diament	A	0	1	0	0,33
	B	0,26	0,46	0,73	0,48
	C	0,66	0,45	0,58	0,56
	D	0,5	0,44	0,70	0,55
	E	0,60	0,43	0,96	0,66
PG Gdańsk	VX1	0,81	0,40	1	0,74
	VX2	0,14	0,60	0,84	0,53
	VX3	0,67	0,10	0,99	0,59
	VX4	0,81	0,14	0,99	0,65
MoleMab	MM	1	0	0,97	0,66
Rappold	RAP	0,57	0,43	0,95	0,65
Keramika	KER	0,86	0,18	0,96	0,67

**Rys. 103.** Kwantyfikacja stanów jakości użytkowej badanych ściernic**Fig. 103.** Quantification of functional quality states of grinding wheels being tested

Na uzyskane wartości nałożono odpowiednie przedziały określające klasy stanów. W tym zakresie wykorzystano wartości graniczne klas stanów i ich nazwy zaproponowane przez Kolmana [68]. Przedziały te pozwalają pogrupować badane partie ściernic na określone klasy jakości użytkowej. Podział ten potwierdza wcześniej poczynione uwagi dotyczące przydatności użytkowej badanych partii ściernic. Stanem dogodnym do danej operacji charakteryzują się ściernice z produkcji laboratoryjnej o symbolu spoiwa VX1, a stanem niekorzystnym – ściernice o spoiwie A z produkcji przemysłowej.

5.3. Wpływ modułu E na wskaźniki jakości użytkowej ściernic

Zależność korelacyjną wskaźników jakości użytkowej Q_s ściernic od modułu E , (przyjmowanego jako miernik jakości projektowej Q_p i jakości wykonania Q_w) wyznaczono dla badanych ściernic o charakterystyce: 1C35x20x10/CrA80J7V, produkowanych przemysłowo w Firmie Inter Diament w Grodzisku Maz. Do opracowania modeli wykorzystano dane z tab. XIV. Zestawione tam wartości dotyczą wyników badań eksploatacyjnych wytypowanych ściernic z każdej partii o liczności $n = 100$ szt., różniące się między sobą typem zastosowanego spoiwa. W każdej partii dokonano segregacji grupowej ściernic pod względem modułu E , według podzakresów E -skali. Do badań wytypowano narzędzie o reprezentatywnej wartości tego parametru dla danego podzakresu.

Zależności funkcyjne pomiędzy badanymi zmiennymi podano w tab. XVIII, a współczynniki korelacji dla tych funkcji zestawiono w tab. XIX [136].

Tab. XVIII. Zależności funkcyjne wskaźników oceny jakości użytkowej ściernic

Tab. XVIII. Functional relations of functional quality coefficients for grinding wheels

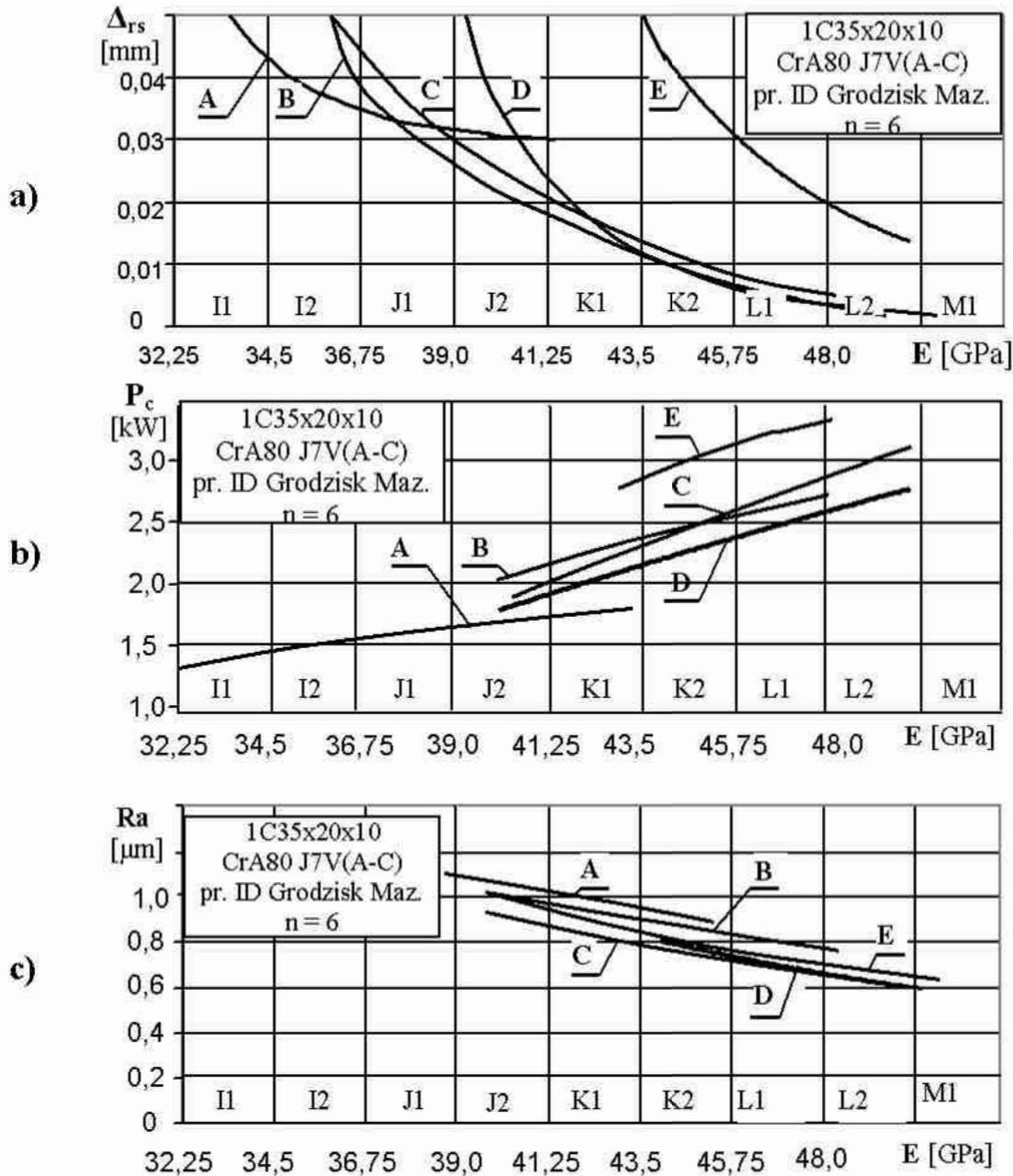
Typ spoiwa	$\Delta_{rs} = f(E)$ [mm]	$P_c = f(E)$ [kW]	$Ra = f(E)$ [μm]
A	$\Delta_{rs} = 52,6 e^{-0,118E}$	$P_c = 0,473 e^{0,029E}$	$Ra = 0,48 e^{-0,017E}$
B	$\Delta_{rs} = 1548 e^{-0,210E}$	$P_c = 0,396 e^{0,041E}$	$Ra = 3,75 e^{-0,034E}$
C	$\Delta_{rs} = 1761467 e^{-0,365E}$	$P_c = 0,093 e^{0,072E}$	$Ra = 7,34 e^{-0,053E}$
D	$\Delta_{rs} = 6575 e^{-0,215E}$	$P_c = 0,214 e^{0,054E}$	$Ra = 5,96 e^{-0,046E}$
E	$\Delta_{rs} = 777 e^{-0,214E}$	$P_c = 0,998 e^{0,02E}$	$Ra = 6,80 e^{-0,048E}$

Tab. XVIII. Współczynniki korelacji dla funkcji z tab. XVIII

Tab. XVIII. Correlation coefficients for functions listed in Tab. XVIII

Typ spoiwa	$r[\Delta_{rs} = f(E)]$	$r[P_c = f(E)]$	$r[Ra = f(E)]$
A	$r = -0,8620$	$r = 0,6386$	$r = -0,5415$
B	$r = -0,9492$	$r = 0,7642$	$r = -0,5631$
C	$r = -0,9917$	$r = 0,9569$	$r = -0,8201$
D	$r = -0,6893$	$r = 0,8271$	$r = -0,8114$
E	$r = -0,9285$	$r = 0,6699$	$r = -0,6801$

Graficzny obraz otrzymanych zależności funkcyjnych: zużycia promieniowego ściernicy Δ_{rs} , maksymalnej mocy skrawania P_c oraz chropowatości szlifowanej powierzchni (opisywanej parametrem Ra) od modułu E badanych ściernic, przedstawiono na rys. 104.



Rys. 104. Wpływ modułu E ściernic z różnych typów spoiwa ceramicznego na: zużycie promieniowe ściernic, b) maksymalną moc skrawania, c) chropowatość szlifowanej powierzchni

Fig. 104. Influence of the modulus E of grinding wheels made with different types of ceramic binders on: a) radial wear of grinding wheels, b) maximum cutting power, c) machined surface roughness

Przeprowadzona analiza wykazała, że występujące różnice w zużyciu ściernic Δ_{rs} , należących do tej samej partii, ale charakteryzujących się zróżnicowanymi wartościami modułu E , są statystycznie istotne na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (wartość funkcji testowej $t_o = 14,5 > t_{0,05} = 9,3$). Istotność statystyczna na tym poziomie występuje również pomiędzy ściernicami o spoiwie typu A oraz wszystkimi pozostałymi ($t_o = 18,56 >> t_{0,05} = 9,3$).

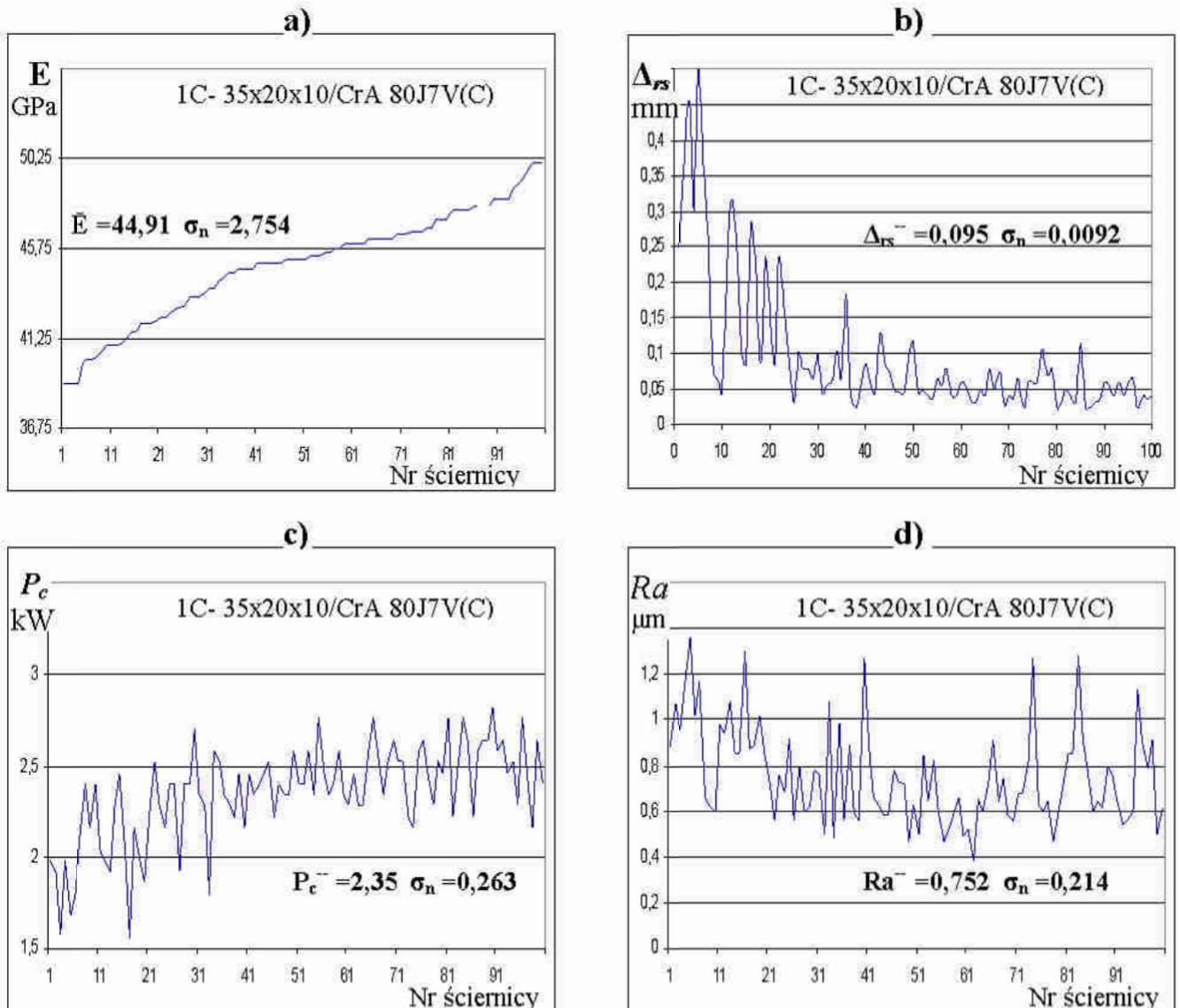
W zakresie maksymalnego zapotrzebowania mocy na skrawanie P_c (rys. 104b) różnice statystycznie istotne (przy $\alpha = 0,05$) występują pomiędzy ściernicami różniącymi się między sobą jedną klasą twardości według E -skali ($t_o = 0,45 > t_{0,05} = 0,387$). Przy ściślejszej klasyfikacji (według podzakresów tej skali) występujące różnice są statystycznie nieistotne. Zmiana typu spoiwa wpływa także na zróżnicowane zapotrzebowanie maksymalnej mocy skrawania P_c . Różnice statystycznie istotne występują pomiędzy spoiwem typu A, grupą spoiw: B, C, D ($t_o = 0,92 > t_{0,05} = 0,356$) oraz spoiwem E ($t_o = 0,51 > t_{0,05} = 0,356$).

Z analizy statystycznej chropowatości powierzchni szlifowanej ściernicami o różnym module E (rys. 104c) wynika, że w zakresie objętym badaniami występujące różnice, przy $\alpha = 0,05$, są statystycznie nieistotne, ponieważ wartość funkcji testowej $t_o = 0,04 > t_{0,05} = 0,156$.

Przy tym poziomie istotności zróżnicowanie statystycznie istotne występuje przy wykonywaniu ściernic ze spoiw typu B i C ($t_o = 0,16 > t_{0,05} = 0,14$) oraz spoiw A i C ($t_o = 0,27 > t_{0,05} = 0,14$).

Na podstawie przeprowadzonej analizy można postawić wniosek, że zróżnicowanie jakości technicznej w partii ściernic ceramicznych wpływa na statystycznie zauważalne zróżnicowanie jakości użytkowej tych narzędzi.

Aby potwierdzić słuszność takiego wniosku przeprowadzono pełniejsze badania eksploatacyjne, na wszystkich egzemplarzach ($n = 100$ szt.) z partii ściernic o określonym typie spoiwa. Do badań wybrano spoiwo typu C, jako najbardziej reprezentatywne dla danej grupy spoiw ceramicznych. Podczas próby eksploatacyjnej, realizowanej na opisanym wcześniej stanowisku badawczym i przy podanych warunkach obróbki, mierzono wartości przyjętych wskaźników jakości użytkowej: zużycia promieniowego ściernicy Δ_{rs} , maksymalnej mocy skrawania P_c oraz chropowatości powierzchni szlifowanej badanymi ściernicami. Przed przystąpieniem do badań eksploatacyjnych wyznaczono dla każdej ściernicy wartość modułu E . Po wykonaniu badań eksploatacyjnych, uporządkowano ściernice według wzrastającego modułu E (nr 1 – ściernica o najmniejszej wartości modułu E w danej partii, nr 100 – ściernica o największej wartości tego parametru). Skorelowano następnie otrzymany ciąg zmienności modułu E dla danej partii ściernic z wynikami badań eksploatacyjnych. Graficzny obraz tego działania pokazano na rys. 105.



Rys. 105. Wyniki badań eksploatacyjnych partii ściernic o liczności $n = 100$ szt.

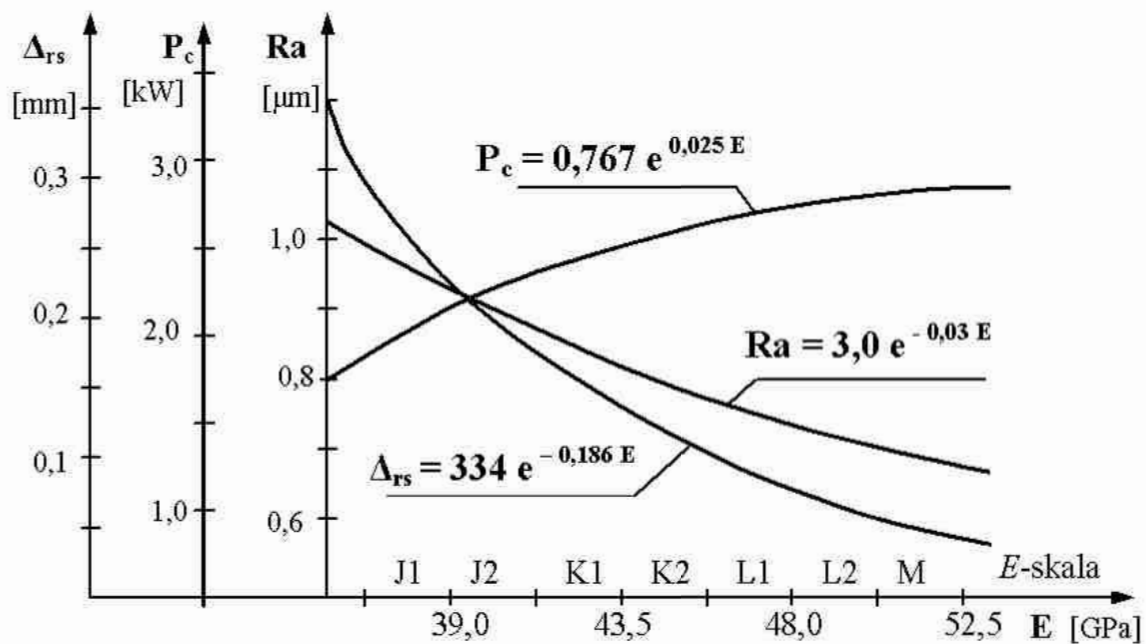
Fig. 105. Result of investigations of exploational parties wheels (the $n = 100$ piece)

Uzyskane wyniki badań potwierdzają wcześniejsze rozważania dotyczące zarówno zmienności modułu E w partii narzędzi o określonej charakterystyce, jak i powiązaniach tego parametru z badanymi wskaźnikami eksploatacyjnymi.

Z analizy rys.105a wynika, że mimo takiego samego oznaczenia w danej partii znajdują się ściernice o zróżnicowanych własnościach. Według wartości normatywnych E -skali, twardość tych narzędzi zawiera się w zakresie nie jednej ale trzech klas, a w projektowanej klasie „J” znajduje się tylko 15% ściernic. Można więc oczekiwać, że nie pozostanie to bez wpływu na zachowanie eksploatacyjne tych narzędzi. Wniosek ten potwierdził się w całej rozciągłości podczas przeprowadzonych badań. Dowodem tego są wykresy rozpatrywanych wskaźników eksploatacyjnych, pokazane na rys.105b, c, d.

Z przebiegu zależności z rys.105b wynika, że szczególnie duże różnice w zużyciu Δ_{rs} , występują wówczas, jeżeli obróbka odbywa się ściernicami o zbyt niskiej twardości w stosunku do zapotrzebowania. Zużycie takich ściernic jest bowiem od kilku do kilkunastu razy większe niż pozostałych. Wpływ tej grupy ściernic na przebieg procesu obróbki objawia się także i w przypadku pozostałych wskaźników oceny ich pracy (rys. 105c, d) Są to ściernice zbyt „miękkie” do danej operacji i należałoby je wyselekcjonować i usunąć. Można wówczas prognozować większą skuteczność wykonania danej operacji.

Przeprowadzona analiza statystyczna potwierdza wcześniejszy wniosek, że pomiędzy modułem E a zużyciem promieniowym ściernic Δ_{rs} oraz zapotrzebowaniem mocy skrawania istnieje bardzo silna zależność korelacyjna (współczynnik korelacji w pierwszym przypadku ma wartość $r = -0,9651$, a w drugim $r = 0,9643$). Współczynnik korelacji w przypadku zależności funkcyjnej $Ra = f(E)$ ma niższą wartość ($r = -0,7943$), co wskazuje na mniejszą siłę korelacji. Przy 5% ryzyku popełnienia błędu przeciętne wartości badanych wskaźników można opisać zależnościami podanymi na rys. 106.



Rys. 106. Zależność wskaźników jakości użytkowej ściernic od modułu E

Fig. 106. Dependence of functional quality coefficients on the modulus E

Zależności funkcyjne pokazane na rys. 106 stanowią model trybologiczny zachowań eksploatacyjnych partii badanych ściernic w danym systemie operacyjnym. Znajomość tego modelu jest podstawą budowy modelu niezawodnościowego i prognozowania niezawodnych okresów pracy tych narzędzi.

5.4. Wpływ jakości użytkowej ściernic na niezawodność systemu

Podejście systemowe do oceny jakościowej wykracza poza pojedyncze wydarzenia, łączy we wzorzec wydarzenia, które wydają się być odległe i niezależne od siebie. Efektywność pracy ściernic w danym systemie operacyjnym zależy nie tylko od ich potencjalnych własności, opisanych charakterystyką techniczną, ale także od zindywidualizowanych właściwości użytkowych konkretnego narzędzia, wywołanych szeregiem przyczyn losowych. Takie zindywidualizowanie wpływa negatywnie na stabilność procesu i uzyskiwane wyniki obróbki. Dla pojedynczego narzędzia nie można wcześniej przewidzieć (prognozować) jego indywidualnego zachowania się podczas eksploatacji – do tego celu potrzebne są odpowiednie „próby pracą”, można jednak postawić prognozę statystyczną dla większego zbioru (partii produkcyjnej) tych narzędzi, korzystając z teorii niezawodności [131].

Jeżeli jest ustalony zbiór wymagań W i warunki pracy systemu \underline{SO} (środowisko, w którym dane narzędzie jest „zanurzone”), to zazwyczaj (a dotąd prawie wyłącznie) bada się niezawodność jako funkcję czasu pracy t narzędzia przy ustalonym W oraz \underline{SO} [102].

Miarą niezawodności narzędzia względem zadania produkcyjnego określonego przez (t, W, \underline{SO}) jest prawdopodobieństwo wykonania tego zadania

$$R = p(t, W, \underline{SO}) \quad (89)$$

Ocena i estymacja prawdopodobieństwa R wymaga przeprowadzenia określonych badań niezawodnościowych na próbie danych wyrobów, a następnie postawieniu prognozy statystycznej, przy założeniu, że [4]

$$(W, \underline{SO}) = \text{const} \quad (90)$$

Zastosowanie statystycznej teorii niezawodności do systemowej oceny jakości ściernic sprowadza się więc do wyznaczenia składników wzoru (89), przy mocnym przestrzeganiu warunku (90). Oznacza to, że postawiona prognoza statystyczna dotycząca niezawodnej pracy ściernic jest słuszna dla tego i tylko tego zestawu (W, \underline{SO}) , który był przyjęty w niniejszej pracy. Metodologia postępowania może być natomiast wykorzystywana do prognozowania statystycznego niezawodności innych systemów operacyjnych.

Prognozą statystyczną nazywa się każdy sąd, którego prawdziwość jest zdarzeniem losowym, przy czym prawdopodobieństwo tego zdarzenia jest znane i wystarczająco duże dla celów praktycznych [34]. Wartość sądu zwanego prognozą można określić po upływie czasu, na który prognoza była wyznaczona, natomiast w chwili określania prognozy można wskazać stopień zaufania do

niej [15]. W tym celu używa się prawdopodobieństwa (p), które jest miarą niezawodności (R) [102].

Prognoza odnosi się do danego obiektu (układu bądź systemu), w którym zachodzą zjawiska, dające się opisać za pomocą określonych wielkości (zmiennych ilościowych lub jakościowych). Prognozowanie niezawodności ściernic sprowadza się więc do przewidywania prawdopodobieństwa poprawnej pracy narzędzi (w wyznaczonym czasie t_m) z partii wyrobów o określonej charakterystyce, w danym systemie operacyjnym SO .

W zakresie budowy takich modeli dla narzędzi ściernych wyróżnia się trzy kierunki [131]:

1. Prognozuje się przebieg całego procesu obróbki, biorąc pod uwagę zarówno wariancje właściwości eksploatacyjnych narzędzia, parametrów procesu, jak i własności obrabianego przedmiotu.
2. Prognozuje się działanie konkretnego narzędzia, o małej wariancji trwałości (np. ściernice z CBN), przy zmiennych warunkach eksploatacji.
3. Prognozuje się poprawność pracy określonej partii narzędzi (o istotnej wariancji trwałości) w przyjętych warunkach obróbki.

O ile w pierwszych dwu przypadkach niezbędne jest określenie możliwych obszarów zmienności parametrów obróbki i zachowania się badanego narzędzia w każdej strefie obszaru tych parametrów, o tyle w trzecim przypadku występuje nieokreśloność właściwości eksploatacyjnych narzędzia z danej partii i prognoza związana jest z wykryciem trendu zmian istotnych parametrów (k), stanowiących kryterium trwałości T_k [4].

W niniejszej pracy jak kryteria (k) trwałości badanych ściernic przyjęto:

- zużycie promieniowe ściernicy Δ_{rs} ; mm,
- maksymalną moc skrawania P_c ; kW,
- chropowatość szlifowanej powierzchni Ra ; μm .

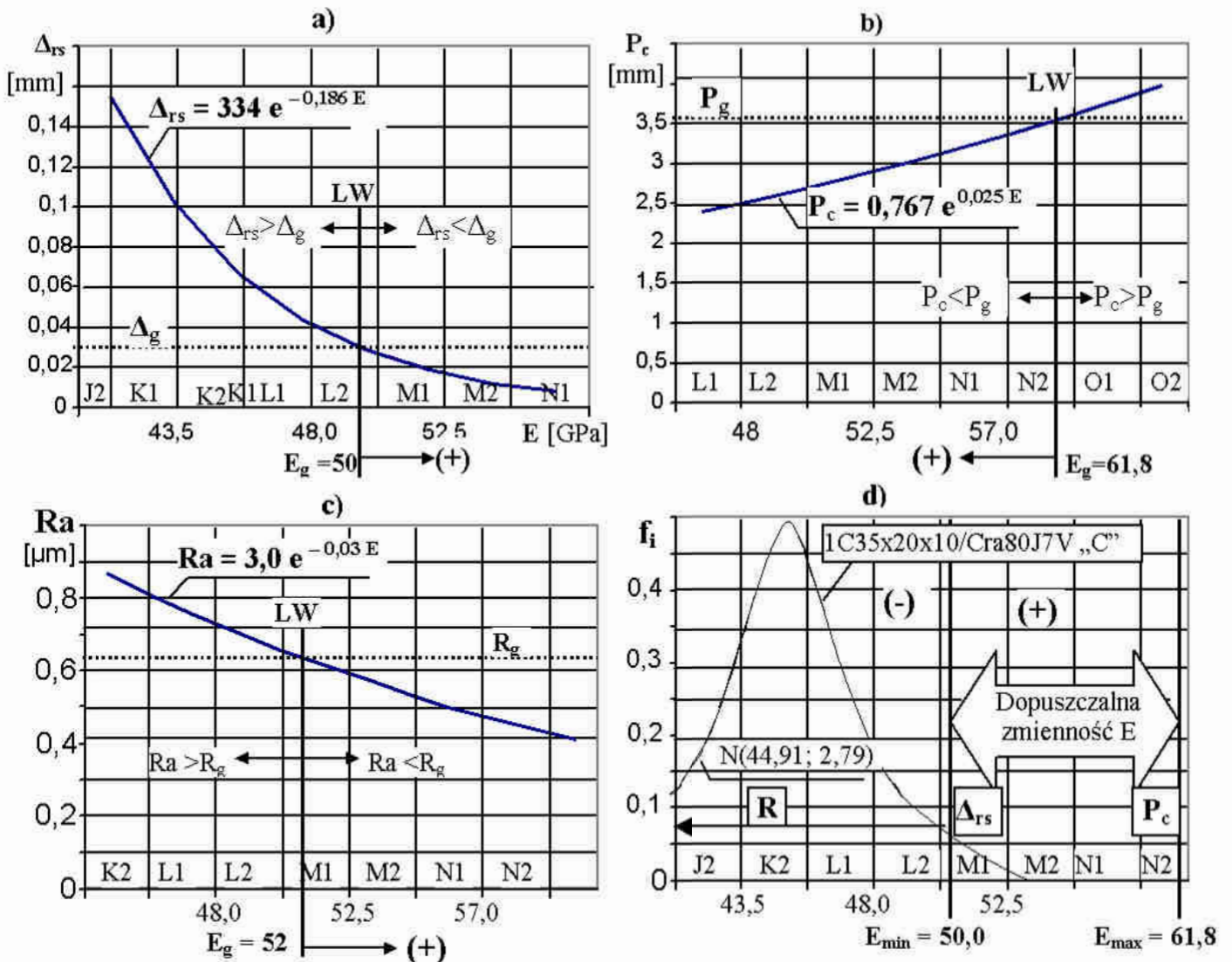
Stąd można wyróżnić trzy rodzaje trwałości:

- T_A – trwałość ze względu na zużycie promieniowe ściernicy,
- T_P – trwałość ze względu na zapotrzebowanie mocy skrawania oraz
- T_R – trwałość ze względu na chropowatość szlifowanej powierzchni,

Znając model zmian parametrów kryterialnych trwałości dla danej operacji (rys. 106) oraz wartości graniczne (k_g) tych parametrów można wyznaczyć cechy budowy narzędzia ściernego, przy których spełniane są ograniczenia procesowe. Dla badanego systemu operacyjnego SO słuszne są następujące wartości graniczne parametrów kryterialnych trwałości:

- $R_g \leq 0,63$ [μm] – maksymalna dopuszczalna chropowatość szlifowanej powierzchni, wyrażona parametrem R_a , wynikająca z wymogów procesu technologicznego,
- $P_g \leq 3,6$ [kW] – maksymalna dopuszczalna moc skrawania, wynikająca z zainstalowanego silnika napędu głównego obrabiarki (4 kW) oraz jego sprawności,
- $\Delta_g \leq 0,03$ [mm] – maksymalne dopuszczalne zużycie promieniowe ściernicy, wynikające z maksymalnego dosuwu obciążacza w cyklu automatycznym.

Przy naniesieniu tych wartości na odpowiednie funkcje trendu zmian z rys.106 uzyskuje się linię wymiany LW (+/-), która pozwala rozdzielić cały badany obszar cech budowy narzędzia (opisywanych modułem E) na dwa podobszary decyzyjne: spełniający (+) postawiony wymagania graniczne oraz nie spełniający tego warunku. Położenie tych linii dla poszczególnych wskaźników eksploatacyjnych badanych ściernic pokazano na rys.107.



Rys. 107. Położenie linii wymiany LW , wynikającej z ograniczeń procesowych:

a) zużycia ściernicy, b) mocy obrabiarki, c) chropowatości szlifowanej powierzchni

Fig. 107. Position of the conversion line LW , following from process limitations:

a) abrasive wheel wear, b) grinding machine power, c) machined surface roughness

W rozpatrywanym systemie operacyjnym krytycznymi ograniczeniami są: Δ_{rs} i P_g , które wyznaczają dopuszczalną zmienność (tolerancję) modułu E dla danej operacji ($50,0 < E < 61,8$). Przy zastosowaniu partii ściernic o badanej charakterystyce prognozowane prawdopodobieństwo spełnienia tych wymagań wynosi tylko $p = 0,07$. Zatem takiego rzędu niezawodności R można oczekiwać od danego systemu operacyjnego.

Przy rozpatrywaniu niezawodności narzędzi skrawających metodami statystycznymi przyjmuje się założenie równomiernego zużywania się narzędzia w rozpatrywanym przedziale czasowym [52]. Przyjmując zatem to założenie można wyznaczyć niezawodny okres pracy ściernicy (trwałość T) ze względu na dane kryterium trwałości (k_g) z warunku:

$$T_k \cdot [k = f(E)] \geq t_m \cdot k_g \quad (91)$$

gdzie k jest wybranym wskaźnikiem oceny trwałości ściernic, związanym funkcjonalnie z modułem E (rys. 106), a k_g jego wartością graniczną.

Biorąc pod uwagę np. zużycie ściernicy Δ_{rs} jako krytyczne ograniczenie danego procesu, jej trwałość T_Δ w funkcji modułu E wyrazi się zależnością:

$$T_\Delta = \frac{\Delta_g \cdot t_m}{334e^{-0,186E}} \quad (92)$$

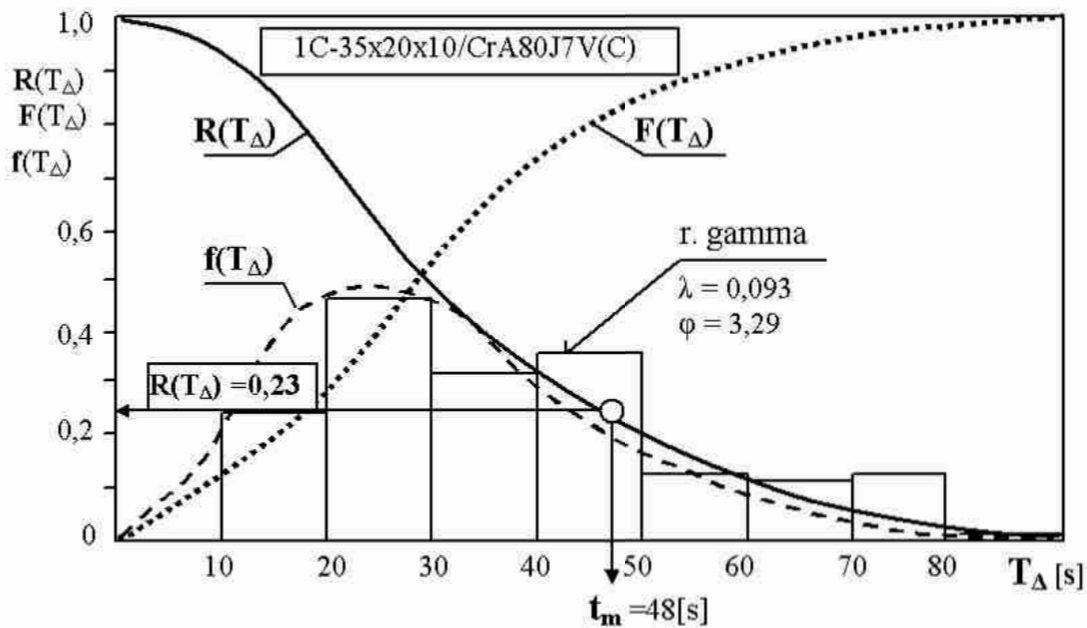
W podobny sposób można wyznaczyć trwałość ściernicy ze względu na dopuszczalną moc skrawania P_g oraz chropowatość szlifowanej powierzchni R_g :

$$T_R = \frac{R_g \cdot t_m}{3,0e^{-0,03E}} \quad (93)$$

$$T_P = \frac{P_g \cdot t_m}{0,767e^{0,025E}} \quad (110)$$

Funkcje te przy nałożeniu warunku: $T_k \geq t_m$ pozwalają wyznaczyć niezawodność R badanej partii ściernic w przyjętym systemie operacyjnym (SO). Z przeprowadzonej analizy danych dla tej partii zamieszczonych na wykresach z rys. 105 wynika, że wartość średnia $T_\Delta = 35,4$ [s], a odchylenie standardowe $\sigma_{n-1} = 19,5$ [s]. Współczynnik zmienności v dla tych wartości wynosi 0,55. Oznacza to, że rozkład zmiennej T_Δ nie może być opisywany rozkładem normalnym, bowiem nie jest spełniany warunek $v \leq 0,33$. Sprawdzone, że najbardziej dopasowanym rozkładem do otrzymanych wyników jest rozkład gamma o parametrach: $\lambda = 0,093$ oraz $\varphi = 3,29$ [131]. Przykład zmienności funkcji,

opisujących niezawodność dla badanej partii ściernic, których trwałość operacyjna T_k jest wyznaczana ze względu na dopuszczalne zużycie Δ_g pokazano na rys. 108.



Rys. 108. Przebieg funkcji niezawodności dla badanej partii ściernic

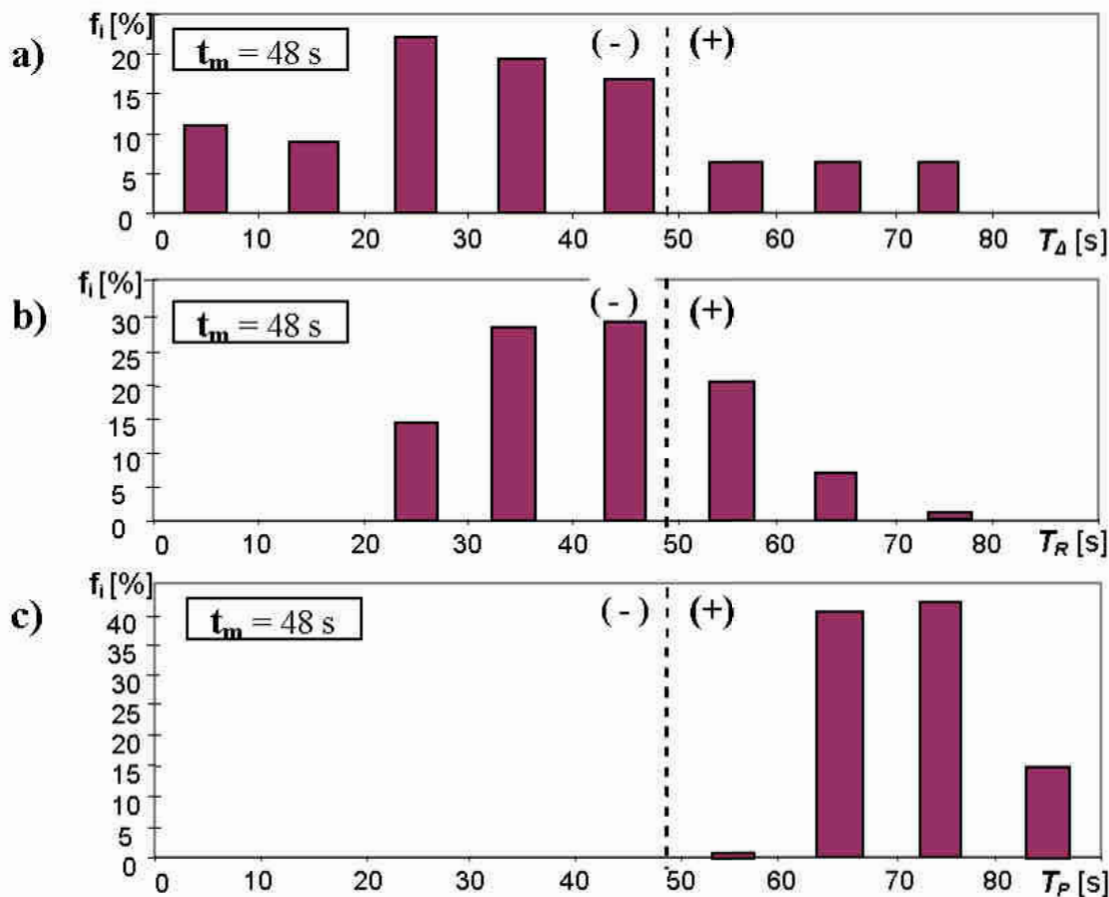
Fig. 108. Survival function character for the grinding wheel batch being tested

Z przebiegu funkcji niezawodności (R) można bardzo prosto określić prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy badanego systemu operacyjnego, względnie z jej przeciwieństwa (funkcji zawodności F) oszacować prawdopodobieństwo tego, że nie zostaną dotrzymane postawione wymagania. Dla założonego czasu operacji $t_m = 48$ [s] prognozowana niezawodność wynosi $R(T_\Delta) = 0,23$.

Graniczna dopuszczalna wartość modułu E jest wyznaczona z warunku prawidłowości funkcjonowania danego systemu operacyjnego. Przy warunku $E \geq E_{min}$ wartość graniczna określa również czas pracy (trwałość operacyjną) użytego narzędzia.

Z analizy funkcji $R = f(T_\Delta)$ wynika, że jest to funkcja asymetryczna, mająca swoje maksimum z lewej strony punktu o współrzędnej $t = T_{sr}$. Jest to układ korzystny, bowiem dzięki asymetrii krzywej występuje w praktyce większa niezawodność niż to wynika z postawionej prognozy [102].

W celu sprawdzenia słuszności tego twierdzenia, przeprowadzono analizę trwałości ściernic z badanej partii, obliczanej ze względu na poszczególne kryteria przyjęte do oceny (Δ_g , P_g , R_g). W celu zbudowania rozkładu częstotliwości rzeczywiste okresy trwałości dla poszczególnych kryteriów pogrupowano w klasy o zmienności 10 s. Graficzny obraz uzyskanych rozkładów trwałości przedstawiono na rys.109.



Rys. 109. Rozkład trwałości operacyjnej badanej partii ściernic

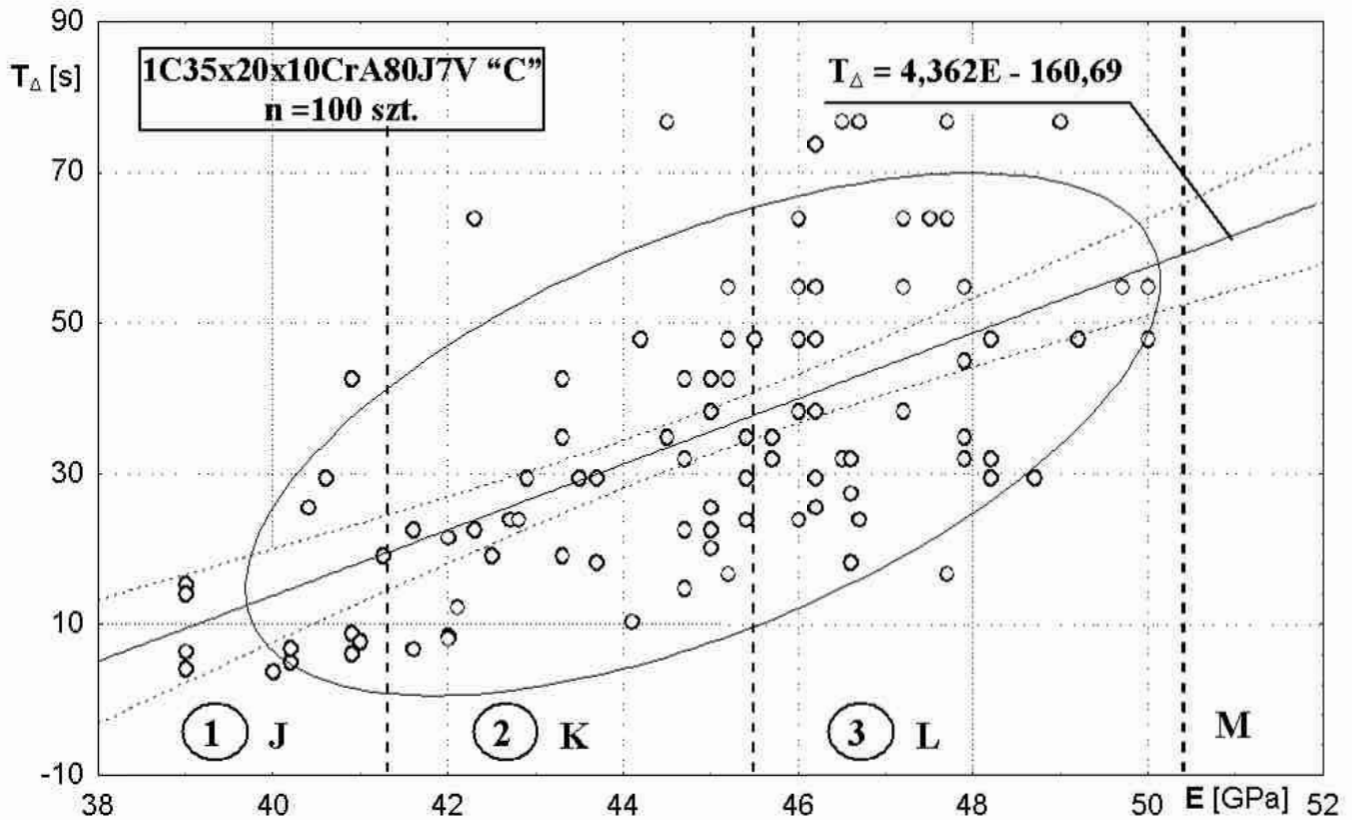
Fig. 109. Operational life distribution for the grinding wheel batch being tested

Z rozkładu rzeczywistej trwałości ściernic liczonej ze względu na ich zużycie (rys. 109a) wynika, że jest to rozkład asymetryczny. W badanej partii ściernic było 17% ściernic, które spełniły postawiony wymóg zużycia granicznego i ich trwałość była większa od czasu maszynowego $t_m = 48$ s. Z prognozy dotyczącej tego warunku (rys. 107) wynikało, że takich ściernic w danej partii będzie tylko 7% ($R = 0,07$). Potwierdza to wcześniejszy wniosek, że asymetria rozkładu wpływa na korzystniejszy wynik niezawodności, niż to wynika z prognozy na podstawie nałożenia rozkładu normalnego modułu E na wartość graniczną zużycia Δ_g .

Jeżeli trwałość ściernic wyznaczana będzie ze względu na chropowatość szlifowanej powierzchni, to niezawodność systemu operacyjnego zwiększa się do poziomu $R = 0,28$. Do jej prognozowania można też posługiwać się rozkładem normalnym – rys. 109b.

Kiedy krytycznym ograniczeniem trwałości staje się maksymalna moc obrabiarki (rys. 109c) wszystkie ściernice spełniały warunek $t_m = 48$ s. Wskazuje to na możliwość stosowania do pracy ściernic o wyższej twardości.

Fakt korzystnego wpływu asymetrii krzywej trwałości T_{Δ} na niezawodność systemu można też zaobserwować na wykresie korelacyjnym – rys. 110.



Rys. 110. Wykres korelacyjny funkcji $T_{\Delta} = f(E)$ dla badanej partii ściernic

Fig. 110. Diagram of the correlation function $T_{\Delta} = f(E)$ for the grinding wheel batch being tested

Na wykresie tym można zauważyć, że istnieje pewna liczba punktów powyżej elipsy opisującej zależność korelacyjną funkcji $T_{\Delta} = f(E)$. Oznacza to, że jest pewna liczba ściernic o trwałości T_{Δ} większej niż można tego oczekiwać z prognozowania na podstawie modułu E .

Związek funkcjonalny pomiędzy modułem E a trwałością operacyjną ściernic T_{Δ} może być opisany prostą regresji liniowej

$$T_{\Delta} = 4,362 E - 160,69 \quad (111)$$

Zależność ta jest uogólnionym modelem związków dwóch skorelowanych procesów:

- procesu „ E ”, czyli ustalania się potencjalnych własności ściernicy w wyniku zamierzeń projektowych oraz oddziaływania przyczyn losowych podczas wytwarzania (mierzonego modułem E),
- procesu „ T ”, czyli ustalania się rzeczywistych właściwości ściernicy w wyniku synergicznego współdziałania elementów systemu operacyjnego, mierzonego okresem trwałości operacyjnej T_{Δ} .

Zarówno proces „ E ” jak i proces „ T ” są procesami losowymi. Dla prognozowania istotne staje się pytanie o prawdopodobieństwo warunkowe tych dwóch skorelowanych ze sobą procesów losowych. Do ustalenia tego prawdopodobieństwa naniesiono na wykres korelacyjny klasy twardości według E -skali, w zakresie których znajdowały się ściernice z badanej partii. Były to klasy: J, K oraz L. Ponieważ z projektowanej charakterystyki ściernic z tej partii wynikało, że ma być to klasa J, przyjęto oznaczenie tej klasy jako 1., klasy K jako 2. oraz klasy L jako 3. partii zawiera się w trzech klasach: J, K, L.

Z otrzymanych danych (rys. 105). wynika, że w badanym zbiorze: 15% ściernic ma moduł E , według którego trwałość T_{Δ} mieści się w zakresie 1. klasy, dla 45% ściernic w zakresie 2. klasy, a dla 40% ściernic w zakresie 3. klasy.

Zagadnienie prawdopodobieństwa warunkowego rozpatrzono, przykładowo, dla następującego zadania: należy ocenić, jakie jest prawdopodobieństwo tego, że trwałość danej ściernicy znajdzie się w zakresie 2. klasy trwałości, jeżeli według modułu E zakwalifikowano ją do klasy 3.

Zagadnienie to można rozwiązać wykorzystując twierdzenie Bayesa o prawdopodobieństwie a posteriori [52].

Prognozowany proces T może przyjąć n wykluczających się i komplementarnych zdarzeń $T_i = 1, 2, \dots, n$. Prawdopodobieństwa tych zdarzeń $p_i(T_i)$ są znane a priori (to jest jednym z celów prowadzenia prób pracą) i spełniają warunek

$$\sum_{i=1}^n p_i(T_i) = 1 \quad (112)$$

Wiadomo, że zaszło pewne zdarzenie E , związane z procesem T (wykonano ściernicę o określonym module E) i znane są wszystkie prawdopodobieństwa $P(T/E)$, wynikające z modelu trybologicznego trwałości kryterialnej $T_k = f(E)$. Wówczas, zgodnie z twierdzeniem Bayesa, prawdopodobieństwo warunkowe, że zajdzie określone zdarzenie T_i (ściernica będzie miała prognozowaną trwałość) opisywane jest zależnością [52]:

$$p(T_i/E) = \frac{p(T_i) \cdot p(E/T_i)}{\sum_{j=1}^n p(T_j) \cdot p(E/T_j)} \quad (113)$$

gdzie:

- $p(T_i/E)$ – prawdopodobieństwo a posteriori, że zajdzie T_i , gdy zaszło E (ściernica o danym module E będzie miała prognozowaną trwałość),
- $p(T_i), p(T_j)$ – prawdopodobieństwo a priori (prognoza),

- $p(E/T_i)$ – prawdopodobieństwo, że zaszło E , gdy zaszło T_i (wiarygodność prognozy E dla zdarzenia T_i) na podstawie posiadanego modelu,
 $p(E/T_j)$ – prawdopodobieństwo, że zaszło E , gdy zaszło $T_j \neq T_i$ (probabilistyczna miara błędu prognozowania).

Zgodnie z danymi na rys. 105, prawdopodobieństwa prognozowanej trwałości narzędzi z badanej partii wynoszą: $p(T_1) = 0,15$, $p(T_2) = 0,45$, $p(T_3) = 0,50$. Zadanie dotyczy wyznaczenia skorygowanego prawdopodobieństwa tego, że trwałość analizowanej ściernicy o module E z klasy L, znajdzie się mimo to w 2. klasie trwałości, która jest przyporządkowana twardości K, czyli poszukiwane jest $p(T_2/E_3)$.

Na podstawie badań analizowanej partii ściernic (rys. 105) oszacowano trafność prognozy (adekwatność badań) i zamieszczono je w tab. XIX.

Tab. XIX. Trafność prognozy trwałości $T\Delta$ na podstawie badań modułu E

Tab. XIX. Accuracy of forecasting the life $T\Delta$ from investigations on the modulus E

$E \backslash T$	E_1	E_2	E_3
1	$P(E_1/T_1) = 0,8$	$P(E_2/T_1) = 0,2$	$P(E_3/T_1) = 0,1$
2	$P(E_1/T_2) = 0,1$	$P(E_2/T_2) = 0,7$	$P(E_3/T_2) = 0,2$
3	$P(E_1/T_3) = 0,15$	$P(E_2/T_3) = 0,25$	$P(E_3/T_3) = 0,7$

Szukane prawdopodobieństwo wyniesie:

$$p(T_2/E_3) = \frac{p(T_2) \cdot p(E_3/T_2)}{p(T_1) \cdot p(E_3/T_1) + p(T_2) \cdot p(E_3/T_2) + p(T_3) \cdot p(E_3/T_3)} =$$

$$= \frac{0,45 \cdot 0,2}{0,15 \cdot 0,1 + 0,45 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot 0,7} = 0,1978 \approx 20\% \quad (114)$$

Prawdopodobieństwo tego, że znajdzie się w trzecim zakresie wynosi:

$$p(T_3/E_3) = \frac{p(T_3) \cdot p(E_3/T_3)}{p(T_1) \cdot p(E_3/T_1) + p(T_2) \cdot p(E_3/T_2) + p(T_3) \cdot p(E_3/T_3)} =$$

$$= \frac{0,50 \cdot 0,7}{0,15 \cdot 0,1 + 0,45 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot 0,7} = 0,7692 \approx 77\% \quad (115)$$

oraz

$$p(T_1/E_3) \approx 3\% \quad (116)$$

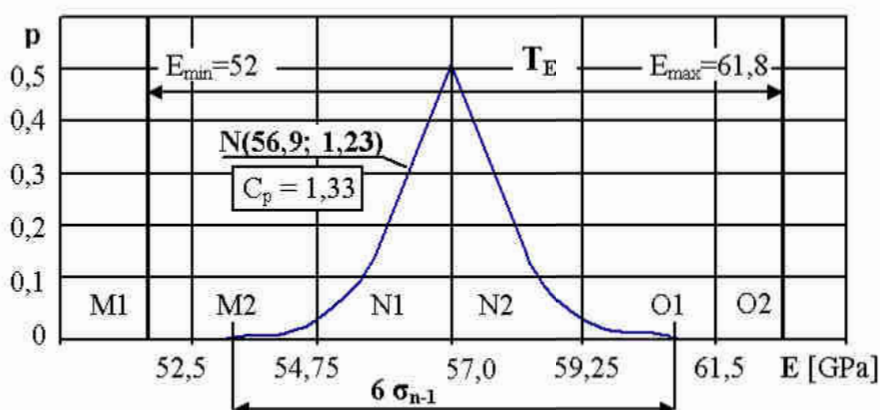
Wynika z tego, że błąd prognozowania dla badanych ściernic wynosi 20%.

W prognozowaniu niezawodności operacyjnej stosuje się różnorodne metody z wykorzystaniem: modelowania, obliczeń analitycznych, informacji statystycznej, oceny ekspertyzowej, metody analogii czy też metody graficznej [15]. Najkorzystniej jest w tym względzie posługiwać się odpowiednimi programami komputerowymi, tzw. systemami ekspertowymi. Istotę i budowę takiego programu, w zastosowaniu do analizowanego problemu niezawodnej pracy badanych ściernic, omówiono w pracy [137]. Program ten zbudowany jest na podstawie opracowanej bazy danych oraz wskaźnik zdolności procesu C_p .

Związany jest on ze zmiennością badanego parametru (opisaną wartością $6\sigma_{n-1}$) oraz zapasem bezpieczeństwa. Mając wyznaczone wartości krytyczne wartości modułu E dla danego systemu operacyjnego (rys. 107) można bowiem zwiększyć jego niezawodność R przez wprowadzenie tego wskaźnika. Z normy PN-ISO 3534-2 wynika, że proces zapewnia uzyskanie postawionych wymagań, jeżeli wartość wskaźnika zdolności jakościowej procesu $C_p = 1,33$. Taką wartość C_p przyjęto zatem na dopuszczalne odchylenie standardowe σ_{n-1} modułu E , liczone według wzoru

$$\sigma_{n-1} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{6 \cdot C_p} \quad [\text{GPa}] \quad (111)$$

Po podstawieniu otrzymano wartość $\sigma_{n-1} = 1,23$ [GPa]. Wartość średnia ($\bar{E} = 56,9$ GPa) tego rozkładu wynika ze średniej arytmetycznej wartości granicznych: $E_{\max} = 61,8$ i $E_{\min} = 52,0$ GPa. Rozkład ten pokazano na rys. 111.



Rys. 111. Dopuszczalny rozrzut modułu E ściernic w rozważanej operacji

Fig. 111. Acceptable scatter of the modulus E of grinding wheels in the process under consideration

Przy takim położeniu rozkładu modułu E ściernic zastosowanych w danym systemie można prognozować jego niezawodność na poziomie $R(t_m) > 0,99$.

ROZDZIAŁ 6

KIERUNKI DOSKONALENIA SYSTEMU OPERACYJNEGO

Istotą podejścia systemowego jest poszukiwanie korzystnych rozwiązań, a nie wdrażanie i trwanie przy jednym. Adaptacja i doskonalenie są bowiem istotnymi cechami systemu, odróżniającymi go od układu (luźno powiązanych ze sobą elementów). Układ może trwać, system zaś rozwija się i usprawnia [3].

Rozwój jest uznawany za zasadniczy cel kierunkowy tworzenia i funkcjonowania systemów. Jest nie tylko ujawnieniem zawartych w nich potencjalnych możliwości, lecz także koniecznością zmiany stanów, wynikającą z nieoptymalnego sposobu funkcjonowania. Nieprzystosowanie systemu do wymagań (otoczenia) prowadzi do konieczności destrukcji dotychczasowej jego struktury. Z nowych elementów lub nowych relacji między nimi powstaje nowa struktura, a z niej nowe pravidła i nowe zachowania [117]. Tego typu działanie jest wbudowane ideowo w każdy system jako sprzężenie zwrotne. Nie każda zmiana jest jednak korzystna (tworząca postęp). Postęp jest czymś więcej niż tylko zwykłą zmianą ilościową. Zmiany ilościowe nie prowadzą do znaczącego postępu. Dopiero wprowadzenie czegoś jakościowo innego (nowa myśl) daje w efekcie postęp [106]. Postęp w systemie polega więc nie tylko na zmianach ilościowych, ale także na jego doskonaleniu przez zmianę jakościową.

6.1. Model doskonalenia systemu

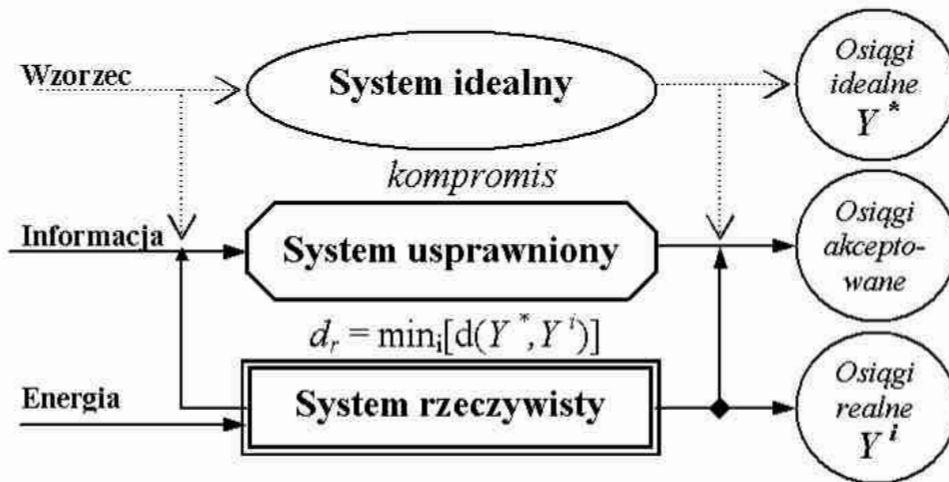
Doskonalenie jakości użytkowej narzędzia ściernego można rozpatrywać jako działanie mające na celu optymalizację efektów użytkowych, uzyskiwanych z danego systemu operacyjnego. Efektywność jest miarą dodatniego efektu, uzyskanego z poniesionych nakładów w określonej działalności człowieka. Uzyskanie takiego efektu tłumaczy się racjonalnością działania, a racjonalność ta oznacza zastąpienie gorszych działań działaniami lepszymi. W praktyce to nic innego jak: „możliwość przetrwania na każdym konkurencyjnym rynku” [83]. Racjonalność świadczy o tym, że stosowane działanie jest poznawczo-ugruntowane poziomem wiedzy w danym zakresie i wynikającymi z niej praktycznymi regułami postępowania. Należy tu jednak podkreślić, że system działania tylko wówczas może być uważany za racjonalny, gdy przyczynia się do optymalnego osiągnięcia ustalonych celów z uwagi na przyjęte kryteria (techniczne i ekonomiczne). Oddziaływać na racjonalność systemu (doskonalić go) można tylko przez doskonalenie jego elementów lub więzi pomiędzy nimi [62].

Dokonując zatem systemowej oceny jakości ściernie pamiętać należy, że ocena ta, to nie tylko wydanie sądów lub opinii o ich funkcjonowaniu w konkretnym systemie operacyjnym, ale podstawa doskonalenia tego systemu. Aby tego dokonać, trzeba zbierać stosowne informacje o skuteczności pracy jego członów, zebrane dane osądzić i uczynić podstawą działań modernizacyjnych.

Każdy rzeczywisty system jest tylko pewnym przybliżeniem systemu idealnego, czyli najlepiej wykoncypowanego (przy danym poziomie wiedzy) modelu, dającego idealne osiągi (Y^*). Mając wybraną miarę odległości każdego z przyjętych atrybutów (Y^i) oceny systemu rzeczywistego od idealnego można zastosować określone procedury optymalizacyjne, prowadzące do akceptowanego rozwiązania, przy którym:

$$d_r = \min_i [d(Y^*, Y^i)] \quad (112)$$

Proces kolejnych usprawnień systemu rzeczywistego prowadzi do zmniejszenia różnicy pomiędzy osiągnięciami rzeczywistymi (Y^i) a modelowymi (Y^*) i na określonym poziomie działań modernizacyjnych uzyskuje się wyniki satysfakcjonujące (wynikające z kompromisu pomiędzy teorią a praktyką) – rys. 112.

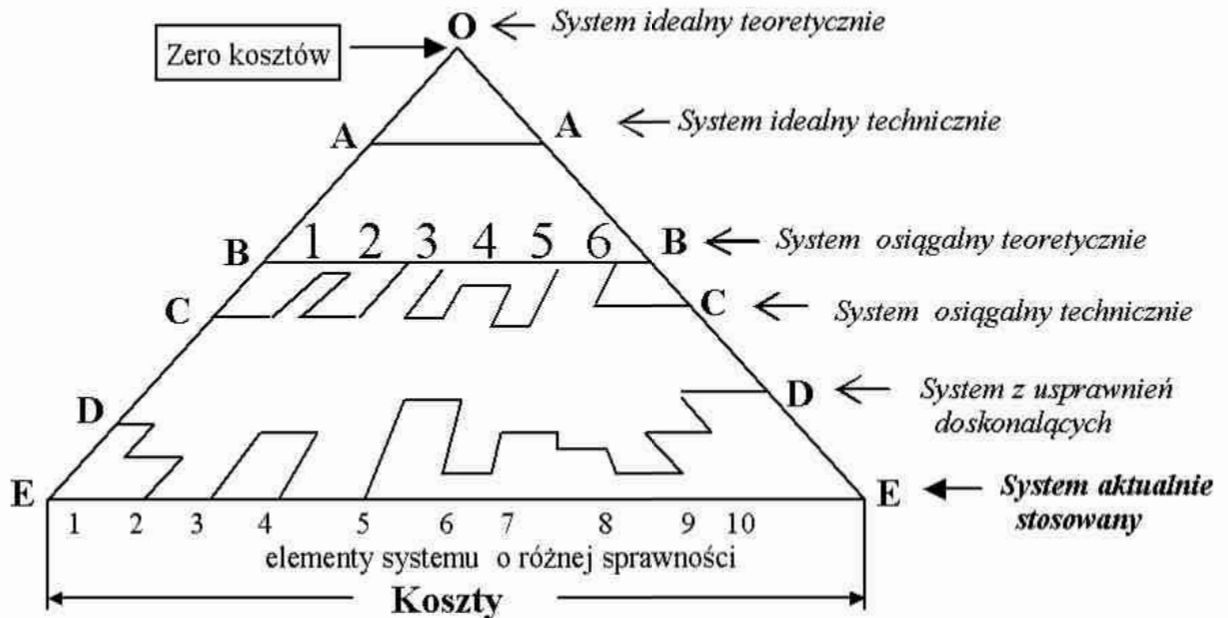


Rys. 112. Doskonalenie systemu jako efekt kompromisu

Fig. 112. The improvement of the system as an effect of compromise

W myśl koncepcji „idealnych wzorców”, opracowanej przez Nadlera [90], racjonalne jest tylko postępowanie: „od wzorca do rzeczywistości”, a nie odwrotnie. Koncepcję tę Nadler obrazuje za pomocą trójkąta, którego podstawę stanowią koszty określonego rozwiązania. Wierzchołek tego trójkąta stanowi teoretyczny system idealny, nieosiągalny w praktyce, gdyż odpowiada mu punkt obrazujący zero kosztów. Na niższym poziomie (A–A) znajduje się idealny system, możliwy technicznie do osiągnięcia (w przyszłości). Jeszcze niżej (B–B) jest poziom systemu technicznie osiągalnego, możliwego do realizacji już obecnie. Z uwagi na istniejące ograniczenia zalecany do stosowania w praktyce jest jednak system z pewnymi odstępstwami

od systemu technicznie osiągalnego (linia C–C). Konwencjonalne usprawnienia (linia D–D) prowadzą w pewnym sensie też do polepszenia dotychczasowego (linia E–E), działania ale efekty nie są zbyt duże. Znaczący rozwój (postęp) osiąga się dopiero przy zmianach jakościowych (linia C–C) rys. 113 [90].



Rys. 113. Model koncepcyjny doskonalenia systemów wg Nadlera [90]

Fig. 113. Conceptual design study of the system improvement according to Nadler

Ideą przewodnią (wzorcem) dla tych zmian winien być zawsze system idealny, którego kryteriami są: minimum kosztów, niezawodność, prostota, równomierność, regularność działania lub stopień realizacji wymagań rynkowych [90]. Współczesne systemy produkcyjne w większości są już zorientowane rynkowo (marketingowo). Orientacja ta polega na tym, że strategią działania jest dostosowanie wytwarzanych produktów do zaspokajania postawionych wymagań w sposób bardziej efektywny niż konkurencja [42]. W tym kontekście doskonalenie (modernizacja) systemu produkcyjnego będzie polegała na znalezieniu takiego działania, które zapewni najlepsze rezultaty nie tylko techniczne, ale i ekonomiczne [75].

Każdą modernizację doskonalącą system określają trzy aspekty [141]:

- cena,
- użyteczność,
- łatwość wykonania.

Mogą być modyfikacje: przydatne lub nie przydatne, drogie lub tanie, łatwe lub trudne we wdrożeniu. Z punktu widzenia rynkowego najważniejszym kryterium powinna być jednak użyteczność, następnie cena, a na końcu łatwość wykonania. Liczy się bowiem: 1) wykonanie zadania, 2) sprzedanie wyrobu na danym rynku, 3) trudności techniczne w jego realizacji.

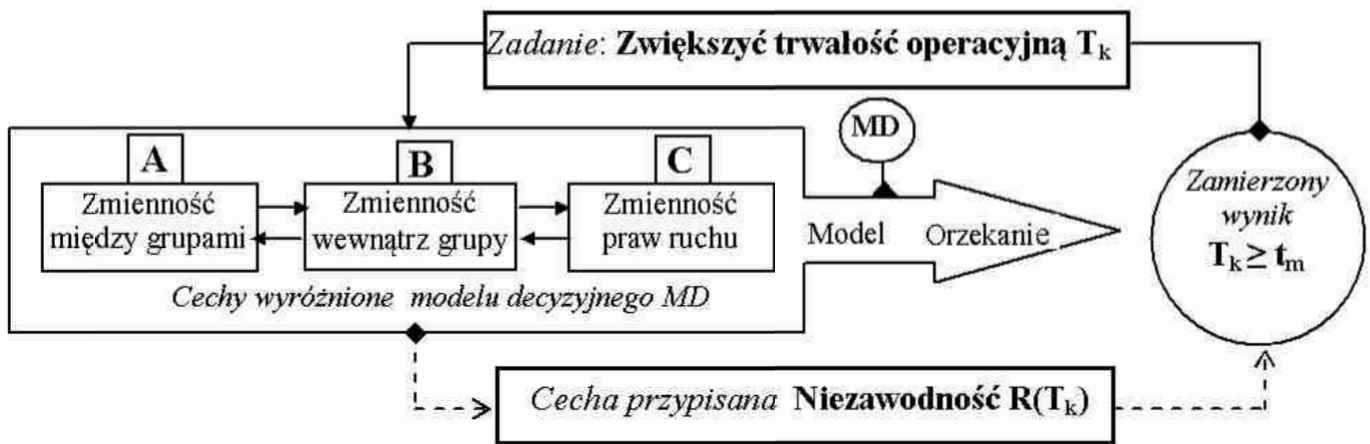
Z punktu widzenia celów i potrzeb sterowania jakością, rynek jest systemem relacyjnym pomiędzy potrzebami i preferencjami ich zaspokajania oraz ograniczeniami budżetowymi konsumenta z jednej strony, a właściwościami użytkowymi i technicznymi wyrobów i ich cenami, kreowanymi przez producenta, z drugiej strony [44]. Wyroby te mają swoją markę i cenę, przez które odbywa się sterowanie „grą rynkową”. Rynek charakteryzują trzy cechy: przedsiębiorczość ludzi, innowacyjność wyrobów oraz konkurencyjność firm. W wyniku konkurencyjnej rywalizacji o klienta powstają innowacyjne wyroby, których czas życia zależy od ich użyteczności [143].

O decyzjach i wyborach uczestników rynku decyduje utylitaryzm, a w utylitaryzmie każde działanie podporządkowane jest użyteczności, każdy motyw działania z tego wynika [71]. Na fundamencie rynku dokonuje się więc oceny przedmiotów pod kątem użyteczności: to jest dobre (ma jakość), co jest użyteczne, zaś użyteczne jest to, co się przyczynia do spełnienia podstawowych wymagań. Użyteczność bowiem, to właściwość każdego przedmiotu, dzięki której konsument osiąga korzyść, przyjemność lub satysfakcję w wyniku użytkowania danego wyrobu. Celem działań racjonalnie myślących uczestników rynku jest zatem maksymalizacja użyteczności. Założenie to jest podstawą teorii konsumenta, opartej na analizie użyteczności końcowej (H.H. Gossena), a należy do subiektywistycznego kierunku poglądów ekonomicznych. Z kierunku tego wywodzą się niemal wszystkie współczesne szkoły i nurty ekonomiczne [155]. Z ekonomicznego punktu widzenia użyteczność zalicza się więc do kluczowych cech każdego wyrobu.

Narzędzia ściernie, a w szczególności ściernice, jako wyroby przeznaczone na rynek dóbr przemysłowych są nośnikiem „użyteczności zadania”. Tego rodzaju użyteczność przynależna jest wyrobowi wówczas, jeżeli powstaje z zastosowania określonych technologii, a wyrób kupiony jest przez klienta dla określonych zadań. [139].

System operacyjny obróbki szlifowaniem – jako zorganizowana całość (zbiór zintegrowanych celowo elementów) – ma także własną wartość i użyteczność, które przewyższają wartość i użyteczność wszystkich z osobna wziętych jego elementów. Użyteczność ściernicy w powiązaniu z obrabiarką i innymi elementami systemu operacyjnego SO jest więc zdecydowanie inna niż jako samodzielnego wyrobu, ale: „system jest tak dobry, jak jego najsłabsze elementy” [63]. Przedmiotem analizy kierunków doskonalenia systemu będzie więc w takim przypadku użyteczność ściernic jako „dobro” wnoszone przez nie do danego systemu operacyjnego. Zmienne decyzyjne mogą zatem dotyczyć zarówno samych ściernic, jak i warunków ich pracy w systemie. Ustalenia wymaga tu jednak zagadnienie użyteczności partii (zbioru) ściernic, wykorzystywanych do pracy w tym systemie operacyjnym. Zbiór ten nie ma swojej odrębnej użyteczności, ponieważ

nie mając cech systemowych – nie tworzy odrębnej całości. Taki zbiór w obrocie rynkowym może być traktowany jako całość (partia), ale każdy egzemplarz wchodzący w skład tego zbioru jest odrębną jednostką. Wartość i użyteczność takiego zbioru jest więc w istocie rzeczą równą wartości i użyteczności poszczególnych egzemplarzy. Użycie tego zbioru w określonym systemie daje niezawodność operacyjną $R(T_k)$ – jako cechę przynależną systemowi i temu zbiorowi. Badanie i zwiększanie użyteczności systemu sprowadza się zatem do badania rozkładu trwałości ściernic ze względu na określone kryterium T_k i taką modyfikację tego rozkładu, aby spełniał on funkcję celu (t_m) i warunki kryterialne danej operacji. Układ logicznie ustalonych możliwości zmian (alternatyw) doskonalących system, tworzy zmienne wejściowe modelu decyzyjnego (MD). Model ten jest podstawą wyboru najkorzystniejszej z alternatyw: A, B lub C – rys. 114.



Rys. 114. Kierunki doskonalenia niezawodności badanego systemu operacyjnego

Fig. 114. Trends towards the reliability improvement of the operating system put on tests

Najważniejszym zagadnieniem praktycznym każdego modelu decyzyjnego jest możliwie dokładne określenie zbioru możliwości, spośród których ma być dokonany wybór. Zwykle ocena taka dokonywana jest za pomocą wielu, często podświadomych kryteriów obiektywnych i subiektywnych. Drugim zagadnieniem jest ustalenie zestawu kryteriów oceny korzyści z danego rozwiązania [111].

W świetle powyższych rozważań, zmienne wejściowe modelu decyzyjnego (MD), ujmującego kierunki zwiększenia niezawodności systemu operacyjnego przez doskonalenie zastosowanych ściernic, mogą dotyczyć:

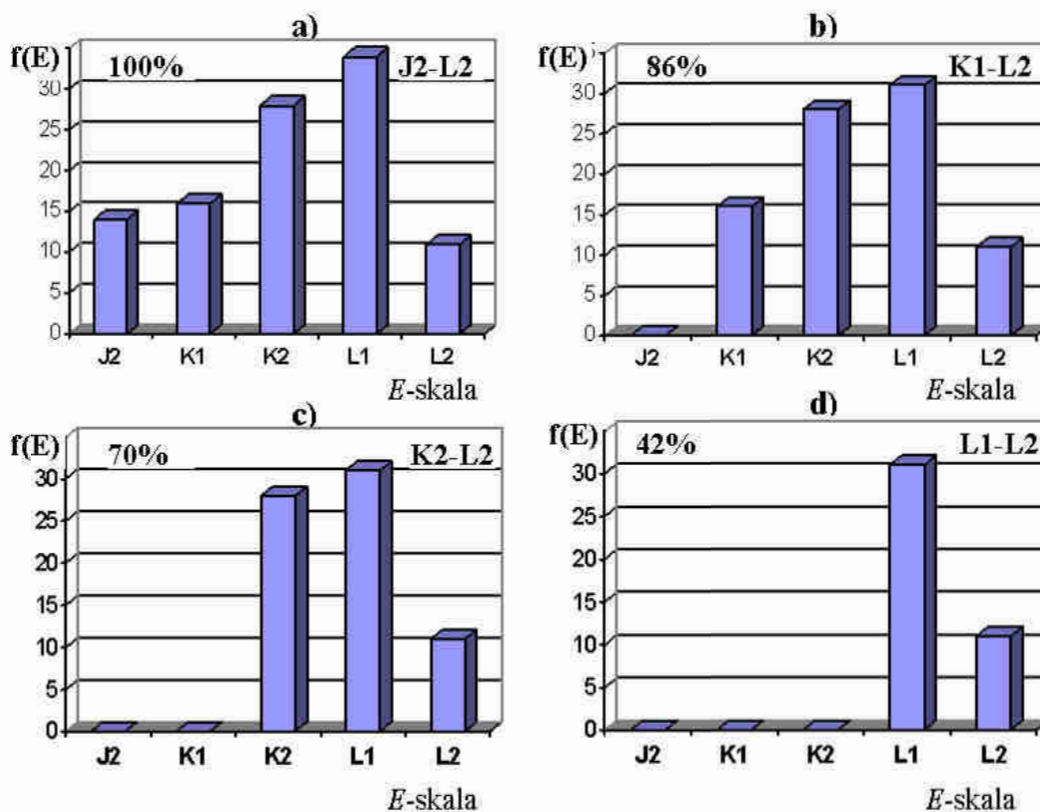
- A – „zmiennosci międzygrupowej” (zmiana charakterystyki technicznej),
- B – „zmiennosci wewnątrzgrupowej” (selekcja według przydatności),
- C – „zmiennosci praw ruchu” (zmiana warunków pracy).

Dla tych alternatywnych rozwiązań wykonano określone badania weryfikujące ich efektywność, a wyniki przedstawiono w kolejnych podrozdziałach pracy. Jako kryterium oceny efektywności danego rozwiązania przyjęto poziom niezawodności $R(T_k)$ badanego systemu operacyjnego.

6.2. Doskonalenie systemu operacyjnego przez selekcję ściernic

Badanie modułu E ściernic metodami akustycznymi jest szybkie, dokładne i nieniszczące. Może być więc wykorzystane do podniesienia efektywności procesu szlifowania na podstawie „doboru ściernic przez eliminację”. Postępowanie takie prowadzone jest na etapie przedeksploatacyjnym i wymaga znajomości wartości granicznych badanego kryterium pomiarowego. Model decyzyjny selekcji opiera się bowiem na zdeterminowanej wartości, dotyczącej „zmienności wewnątrzgrupowej”. Istotą tego modelu jest podział badanego zbioru przynajmniej na dwie grupy selekcyjne o zróżnicowanej jakości użytkowej. Celem takiego postępowania jest wyselekcjonowanie i usunięcie z partii narzędzi o niskiej jakości. Zwiększa się tym samym prawdopodobieństwo poprawnej pracy pozostałych, co jest jednoznaczne ze wzrostem niezawodności systemu.

Do zweryfikowania skuteczności tego typu działania przeprowadzono analizę uzyskanych wyników badań partii ściernic 1C-35x20x10/CrA80J7V(C) o liczności $n = 100$ szt. (p. rys.105). Partię tę podzielono na grupy selekcyjne według modułu E , zgodnie z podzakresami E -skali. Zmienność wewnątrzgrupowa badanego parametru obejmowała 5 podzakresów (od J2 do L2), co dało 5 grup jakościowych o zróżnicowanej ilości ściernic w każdej grupie – rys. 115.

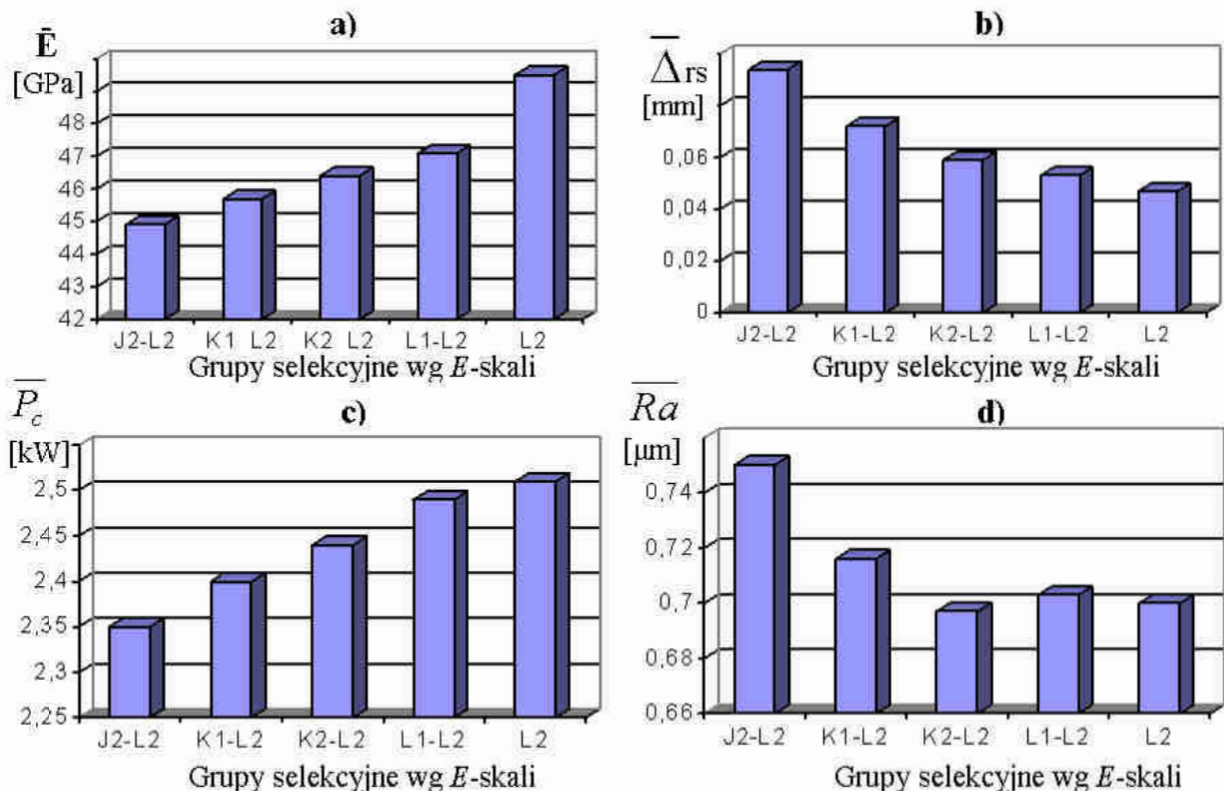


Rys. 115. Selekcja badanej partii ściernic na grupy jakościowe według E -skali

Fig. 115. Grading of an inspection lot of grinding wheels into quality groups on the E scale

Rys. 115a przedstawia częstotliwość występowania ściernic w poszczególnych podzakresach E -skali dla całej badanej partii, natomiast na rys. 115b, c, d, przedstawiono rozkłady po usunięciu kolejnych grup o najniższej (prognozowanej) jakości użytkowej. Tego typu działanie powoduje w praktyce eliminację z partii znacznej liczby narzędzi (ponad 50% dla zakresu L1–L2). Przyjęto założenie, że będzie to jednak korzystne ze względu na niezawodność systemu operacyjnego.

Przeciętne wartości ustalonych wcześniej wskaźników oceny jakości użytkowej ściernic ($\bar{\Delta}_{rs}$, \bar{P}_c , \bar{Ra}), uzyskane z badań eksploatacyjnych ściernic należących do poszczególnych grup selekcyjnych, przedstawiono na rys. 116.



Rys. 116. Wartości wskaźników oceny jakościowej ściernic w podziale partii na grupy selekcyjne: a) moduł E , b) zużycie promieniowe, c) moc skrawania, d) chropowatość szlifowanej powierzchni

Fig. 116. Values of quality assessment indices for grinding wheels in a division of lots into selection groups: a) module E , b) radial wear, c) grinding power, d) machined surface roughness

Z przedstawionych histogramów wynika, że największe zmiany we wskaźnikach jakości użytkowej uzyskuje się przy wyeliminowaniu z badanej partii ściernic z grupy J2. Potwierdziła to przeprowadzona analiza statystyczna, która wykazała różnice statystycznie istotne (przy $\alpha = 0,05$) tylko dla tej grupy. W przypadku pozostałych grup brak jest podstaw statystycznych do takiego stwierdzenia. Wynika z tego, że największy efekt przez selekcję uzyskuje się

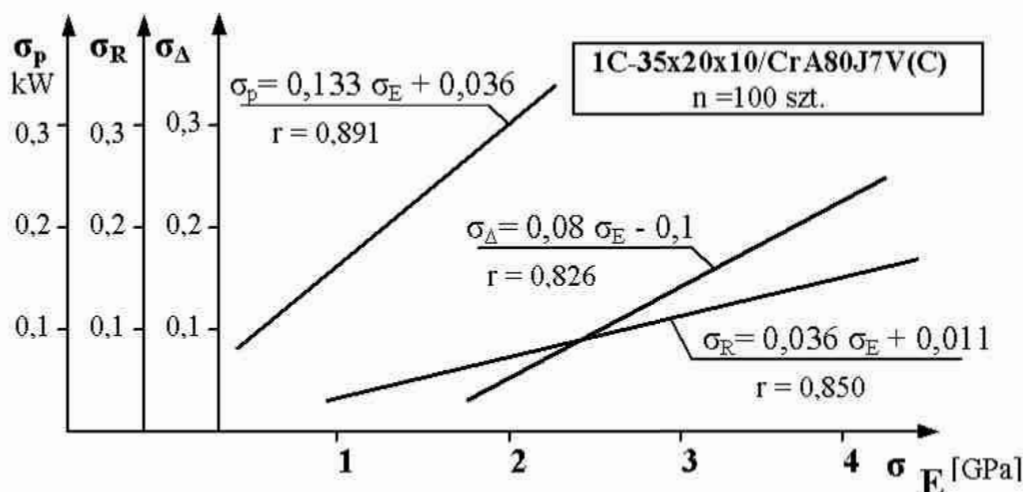
z wykrycia i wyeliminowania grupy o właściwościach użytkowych mocno odbiegających od pozostałych. Klasyfikowanie ściernic według modułu E pozwala wykryć taką grupę. Pełne miary statystyczne wskaźników oceny jakościowej ściernic dla przyjętych grup selekcyjnych zestawiono w tab. XX.

Tab. XX. Wielkości statystyczne parametrów eksploatacyjnych badanej partii ściernic z podziałem na grupy jakościowe wg E -skali

Tab. XX. Statistical quantities of process parameters of an inspection lot of grinding wheels with a division into quality groups on the E scale

Lp.	E -skala		Moduł E		Zużycie ściernic		Moc skrawania		Chropowatość powierzchni	
	Zakres	n szt.	\bar{E} [GPa]	σ_n [GPa]	$\bar{\Delta}$ [mm]	σ_n [mm]	\bar{P}_c [kW]	σ_n [kW]	\bar{Ra} [μm]	σ_n [μm]
1	J2-L2	100	44,91	2,75	0,094	0,093	2,35	0,263	0,750	0,211
2	K1-L2	86	45,69	2,10	0,072	0,055	2,40	0,224	0,716	0,192
3	K2-L2	70	46,41	1,88	0,059	0,040	2,44	0,183	0,697	0,186
4	L1-L2	42	47,10	1,57	0,053	0,007	2,49	0,180	0,703	0,185
5	L2	11	49,50	0,79	0,047	0,013	2,51	0,200	0,700	0,154

Istnieje bowiem także związek statystycznie istotny (przy $\alpha = 0,05$) pomiędzy wartością rozrzutu modułu E (mierzoną odchyleniem standardowym σ) oraz badanych wskaźników oceny jakościowej ściernic – rys. 117 [134].

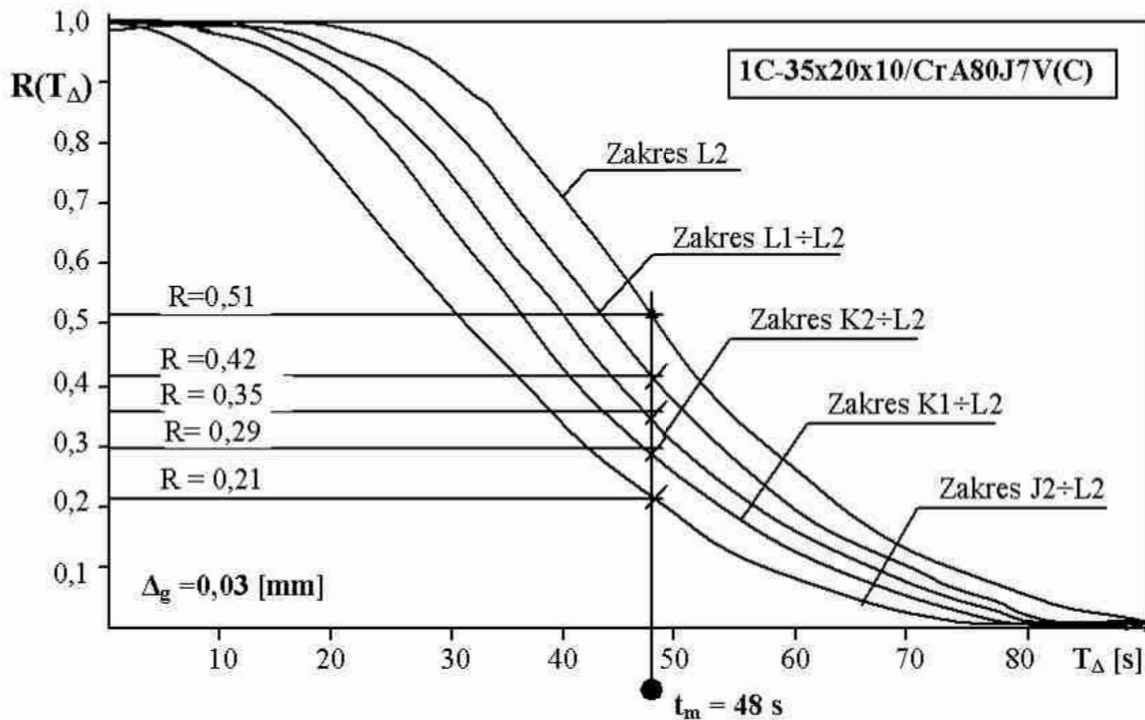


Rys. 117. Wpływ rozrzutu modułu E w badanej partii ściernic na rozrzut: zużycia promieniowego ściernicy (σ_{Δ}), mocy skrawania (σ_P) oraz chropowatości szlifowanej powierzchni (σ_R)

Fig. 117. The effect of the E modulus in an inspection lot on the scatter: grinding wheel radial wear (σ_{Δ}), grinding power (σ_P) and machined surface roughness (σ_R)

Rozrzut ten ma także wpływ na rozrzut trwałości operacyjnej (T_k) danej partii narzędzi, a tym samym na niezawodność $R(T_k)$ całego systemu operacyjnego.

Prognozę dotyczącą niezawodności $R(T_\Delta)$ systemu operacyjnego obróbki pierścieni łożysk tocznych badaną partią ściernic, przy zastosowaniu selekcji jakościowej (według modułu E), przedstawiono na rys. 118.

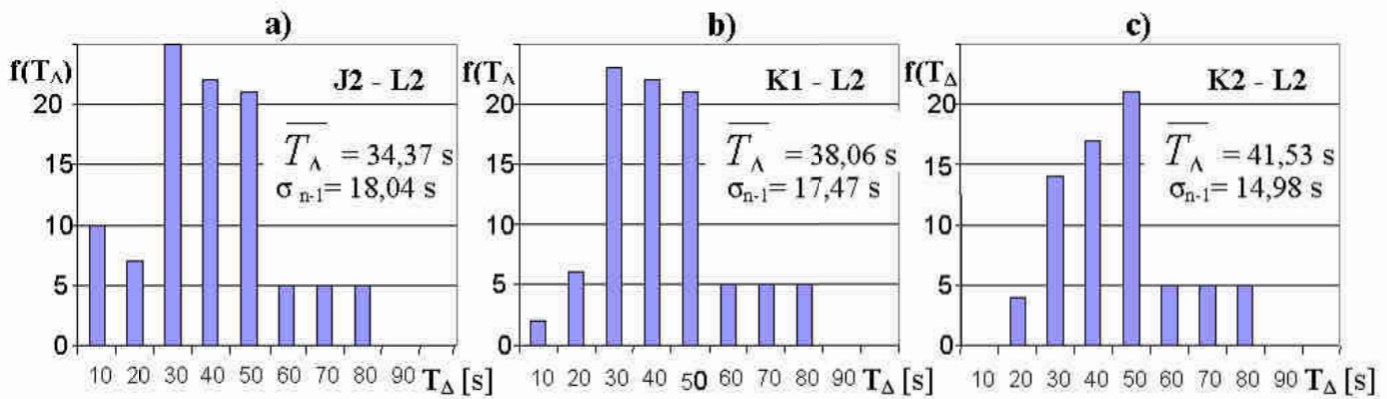


Rys. 118. Prognozowana niezawodność systemu operacyjnego obróbki pierścieni łożysk tocznych przy selekcji jakościowej ściernic według modułu E

Fig. 118. Forecasting the reliability of the operating system for abrasive machining of bearing rings at quality selection of grinding wheels according to the modulus E

Z otrzymanych danych wynika, że dokonując selekcji jakościowej ściernic można podnieść ich okres trwałości, a tym samym zwiększyć prawdopodobieństwo wykonania operacji danej operacji szlifierskiej. Przy wykorzystywaniu całej partii badanych ściernic do danej operacji można oczekiwać spełnienia postawionego kryterium trwałości ($\Delta_g = 0,03$ mm) w 21%. Eliminacja grup ściernic z kolejnych (najniższych) podzakresów E -skali prowadzi do wzrostu prawdopodobieństwa spełnienia tego kryterium do poziomu $R(T_\Delta)_{max} = 51\%$.

Rzeczywiste rozkłady trwałości operacyjnej T_Δ dla całej partii ściernic ($n = 100$ szt.) pokazano na rys. 119a. Rysunek 119b oraz rys. 119c przedstawia natomiast sytuację po wyeliminowaniu z pracy pierwszej J2 ($n = 14$ szt.) grupy selekcyjnej i kolejno drugiej K1 ($n = 30$ szt.).



Rys. 119. Rzeczywiste rozkłady trwałości operacyjnej T_{Δ} badanych ściernic: a) dla całej partii, b) po eliminacji ściernic z zakresu J2, c) po eliminacji ściernic z zakresu K1

Fig. 119. Real distributions of operating life T_{Δ} of grinding wheels being tested: a) for the whole lot, b) after eliminating the grinding wheels from the range J2, c) after eliminating the grinding wheels from the range K1

Z przedstawionych, przykładowo, rozkładów trwałości badanych ściernic można zaobserwować, iż eliminacja z pracy partii narzędzi o najniższych wartościach modułu E , odzwierciedla się zmianami w zakresie najmniejszych wartości trwałości operacyjnej T_{Δ} .

Określono wcześniej, że błąd prognozowanej trwałości ściernic T_{pr} na podstawie oceny ich modułu E wynosi 20%. Podano przy tym, że ponieważ rzeczywisty rozkład trwałości ściernic opisuje rozkład gamma (mający prawostronną skośność), występująca różnica jest wartością korzystną dla użytkownika. Można zatem przyjąć, że trwałość rzeczywista mieścić się będzie w zakresie:

$$T_{pr} \leq T_{rz} < 1,2 T_{pr} \quad (113)$$

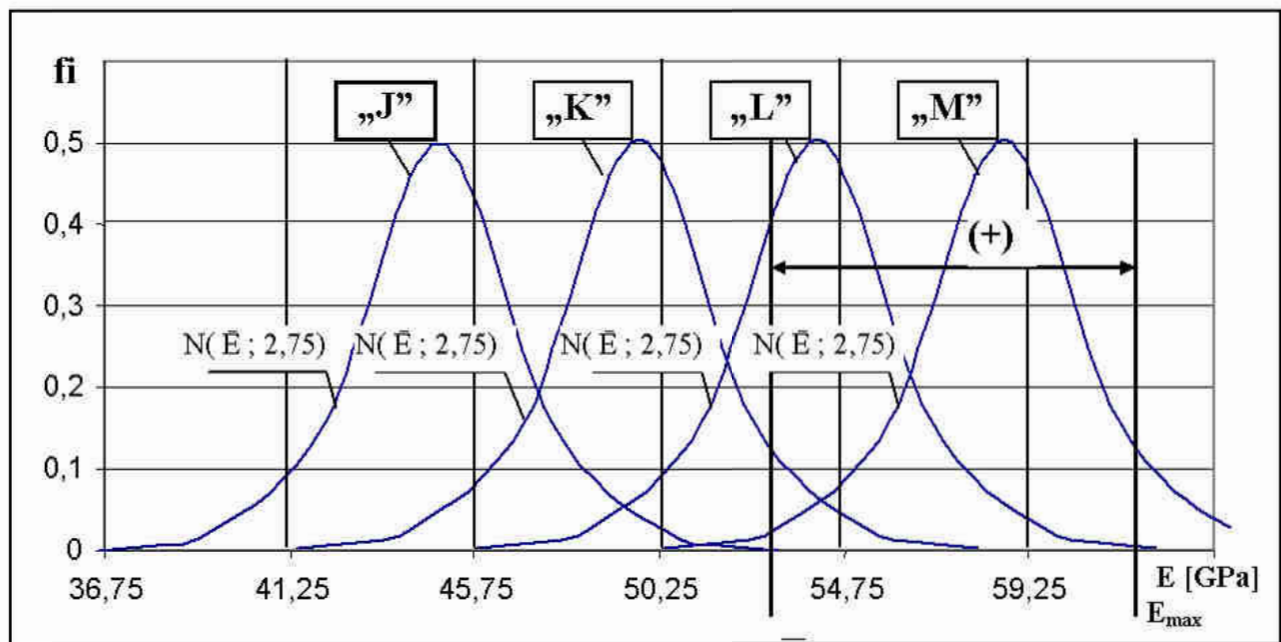
Przeprowadzone badania wykazały adekwatność takiego zapisu w stosunku do ściernic z analizowanej partii. Niezależnie jednak od tej różnicy pomiędzy wartością prognozowaną a rzeczywistą trwałości, aby uzyskać 2-krotny wzrost niezawodności systemu operacyjnego należałoby z danej partii usunąć aż 90% ściernic (zmiana z zakresu J2-L2 na zakres L2). Jest to praktycznie mało realne. Rozwiązania problemu większej efektywności ściernic, a tym samym całego systemu operacyjnego, należy szukać zatem na innej drodze.

6.3. Doskonalenie systemu przez zmianę charakterystyki ściernic

Właściwości użytkowe ściernic ceramicznych zależą w sposób istotny od ich budowy strukturalnej. Budowa ta jest opisywana parametrami charakterystyki technicznej, które są zmiennymi modelu decyzyjnego. Zmienne te umożliwiają podniesienie efektywności procesu szlifowania na podstawie „doboru ściernic

przez modyfikację”. Podstawą tego modelu jest racja techniczna, dotycząca „zmienności międzygrupowej”. Oznacza ona to, że przez zmianę któregośkolwiek parametru charakterystyki technicznej ściernicy należy oczekiwać zmiany jej właściwości użytkowych. Wymaga to jednak dobrej znajomości fenomenologii procesu szlifowania oraz przeprowadzenia określonych doświadczeń, dających informację o natężeniu określonych związków przyczynowo-skutkowych. W niniejszej pracy przyczyny określonych zdarzeń eksploatacyjnych (trwałości operacyjnej T_k ściernic) wiąże się z modułem E , jako syntetycznym miernikiem budowy strukturalnej tych narzędzi. Jego znajomość pozwala sterować efektywnością procesu szlifowania przez sprzężenia zwrotne, oparte na logice zdaniowej typu: *jeżeli „to” – to „to”*.

Z wcześniejszych rozważań wynikało, że dla badanej partii ściernic: 1C-35x20x10/CrA80J7V(C) kryterium graniczne związane z maksymalnym zapotrzebowaniem mocy skrawania P_c nie było przekraczane. Oznacza to, że możliwe jest podniesienie twardości zastosowanych ściernic. Rozpatrzono zatem efektywność tej drogi postępowania, przy założeniu stałości rozrzutu – rys.120.



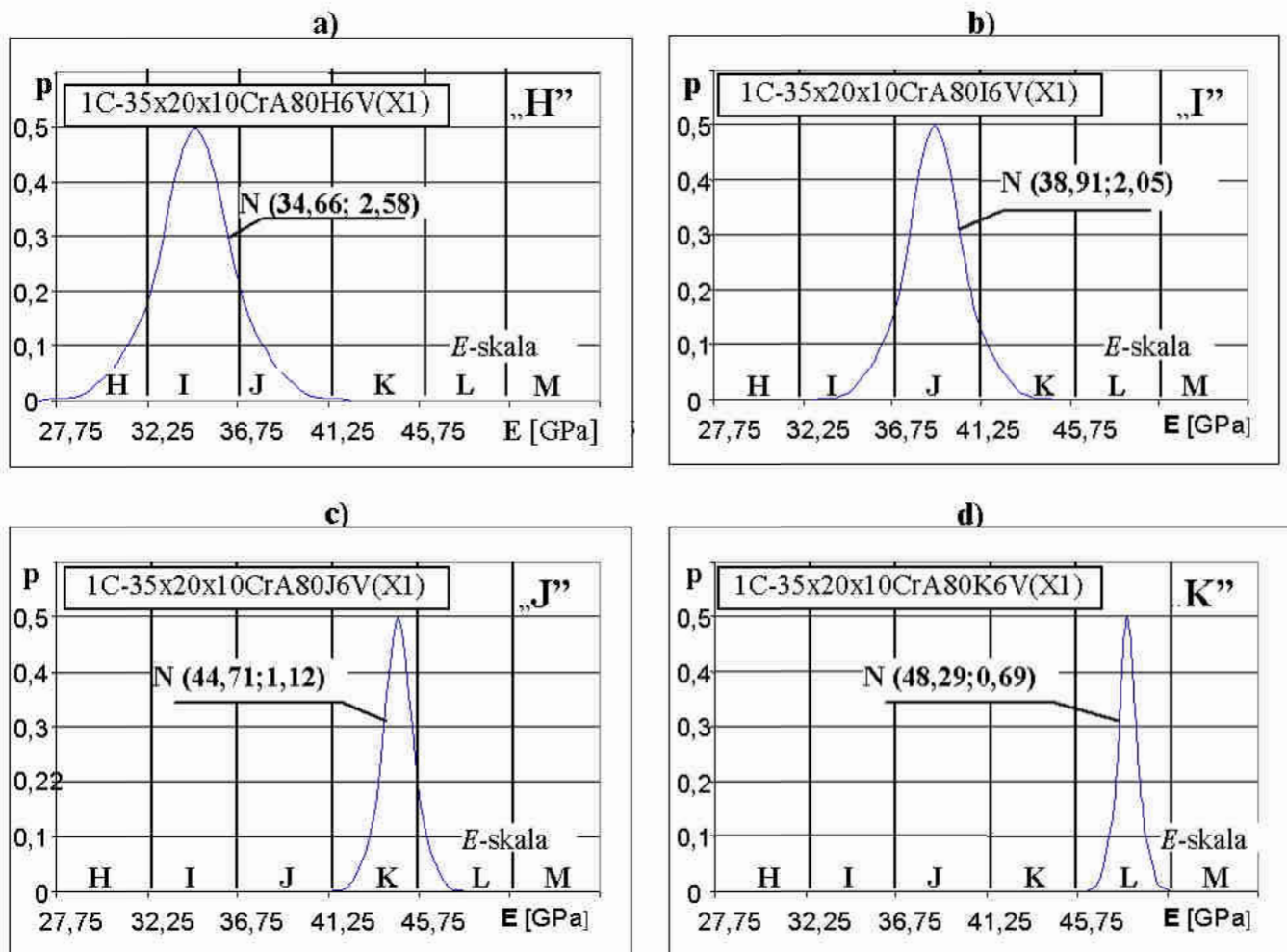
Rys. 120. Doskonalenie systemu operacyjnego przez zmianę twardości ściernic

Fig. 120. The improvement of the operating system by changing the grinding wheel hardness

Zwiększenie twardości badanej partii ściernic o trzy klasy (z J do M), nawet przy zachowaniu tego samego rozrzutu w zdecydowany sposób wpływa na zwiększenie prawdopodobieństwa spełniania przez nie ograniczeń procesowych. Dla danego systemu operacyjnego dopuszczalna zmienność modułu E użytych ściernic zawiera się w granicach: od $E_{min} = 52$ GPa do $E_{max} = 61,8$ GPa.

Przy zastosowaniu partii ściernic o twardości M można prognozować niezawodność danego systemu na poziomie $R = 0,91$. W rzeczywistości będzie ona większa, ponieważ podwyższenie twardości wg skali Nortona ma jeszcze tę zaletę, iż prowadzi do mniejszego zróżnicowania cech strukturalnych (opisywanych modułem E) w partii narzędzi o tej samej charakterystyce.

Postawienie takiego wniosku jest upoważnione na podstawie przeprowadzonych badań ściernic o różnej twardości (według skali Nortona), produkowanych w warunkach laboratoryjnych na Politechnice Gdańskiej. Graficzny obraz rozkładów modułu E tych ściernic przedstawiono na rys.121.



Rys. 121. Wpływ twardości ściernic według skali Nortona na rozrzut modułu E

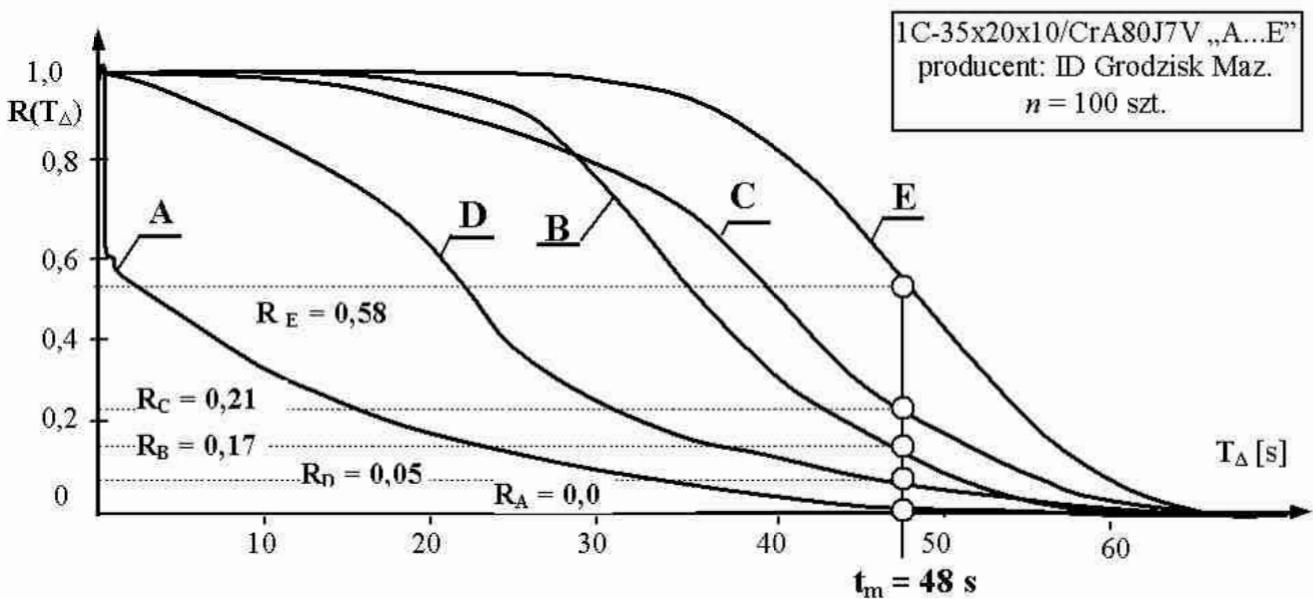
Fig. 121. The effect of the grinding wheel hardness on the Norton scale on the Modulus E scatter

Wynika z niego, że przy małym udziale spoiwa (niska twardość) w ściernicy występuje dość duża przypadkowość w wiązaniu ziaren ściernych mostkami spoiwa. Objawia się to znacznie większymi rozrzutami własności sprężystych niż ma to miejsce przy ściernicach o większych twardościach. Podnoszenie twardości ściernic jest zatem korzystne nie tylko z punktu większej ich odporności na wykruszenia ziaren ściernych w procesie szlifowania, ale także ze

względem na zwiększenie jednorodności cech strukturalnych w partii narzędzi o jednakowej charakterystyce.

Nie tylko ilość spoiwa wpływa na zróżnicowanie cech strukturalnych ściernic ceramicznych, ale także i jego skład surowcowy. O ile modyfikowanie budowy ściernicy przez zmianę ilości spoiwa leży bardziej w gestii użytkownika (przez dobór twardości), to skład surowcowy tego spoiwa jest domeną producenta narzędzi ściernych. Polska Norma dotycząca narzędzi ściernych spojonych (PN-91 M-59101) w systemie oznaczania takich narzędzi przewiduje jednak możliwość takich modyfikacji przez symbol gatunku spoiwa (stosowany przez określonego producenta). Jeżeli zatem „coś” się różnicuje, to można oczekiwać zróżnicowanych oddziaływań tego „czegoś”.

W celu określenia istotności wpływu gatunku spoiwa ceramicznego na zachowania eksploatacyjne ściernic, przeprowadzono analizę niezawodności omawianego systemu operacyjnego, w którym stosowano narzędzia z różnego gatunku spoiwa, produkowane przez Inter-Diamet Grodzisk Maz. Do analizy trwałości operacyjnej T_{Δ} wykorzystano dane z tab. XIV. Wyniki analizy niezawodności systemu, przy warunku $\Delta_g = 0,03$ mm, zobrazowano na rys. 122.



Rys. 122. Wpływ gatunku spoiwa ściernic na niezawodność systemu operacyjnego

Fig. 122. The effect of the grinding-wheel binder grade on the reliability of operating system

Przeprowadzona analiza wykazała, że różnice w niezawodności partii ściernic wykonanych z różnych gatunków spoiwa (A-E) są statystycznie istotne na poziomie $\alpha = 0,05$. Oznacza to, że modyfikując gatunek spoiwa użytego do wykonania ściernic można zmienić zachowanie eksploatacyjne tych narzędzi, a tym samym wpłynąć na efektywność i niezawodność systemu operacyjnego.

Efektywność w odróżnieniu od wydajności (która wiąże działanie ze sposobem jego wykonania) dotyczy istoty realizowanego działania. Zmianę istoty działania w odniesieniu do narzędzi ściernych w największym stopniu można uzyskać przez zmianę rodzaju ścierniwa, np. wprowadzając zamiast ścierniw konwencjonalnych materiały supertwarde (CBN) lub twarde (SG) [99].

Charakteryzując innowacyjne procesy obróbki ścierniej spojonym ścierniwem zwraca się szczególną uwagę na zalety mikrokryształicznego korundu spiekane-go typu SG. To nowe ścierniwo pod względem prezentowanych właściwości wypełnia istniejącą lukę pomiędzy konwencjonalnymi materiałami ściernymi (elektrokorundem i węglikiem krzemu) a regularnym azotkiem boru CBN. Ponadto, narzędzia z tego ścierniwa są zdecydowanie (nawet do 30 razy) tańsze, a wymagania stawiane szlifierkom mniej wygórowane [78].

Podaje się, że do ścierniw z udziałem ziaren SG znacznie korzystniejsze jest stosowanie spoiw szklanokryształicznych niż szklanych (amorficznych) [39]. Postanowiono zatem połączyć oba te kierunki działań modyfikacyjnych i przeprowadzić badania dotyczące efektywności pracy ściernic z mikrokryształicznego korundu spiekane-go typu SG na bazie spoiw szklanokryształicznych.

Badaniom poddano ściernice małogabarytowe o charakterystyce: 1C-25x10x10/5SG80J..NV”DH”. Ścierniwo tych narzędzi było więc mieszanką, składającą się w 50% z ziaren SG oraz w 50% z ziaren Al_2O_3 (tej samej granulacji co ziarna SG). Do sporządzenia mieszanki użyto ziarna SG, typu XTL-0560, przeznaczonego do ściernic konwencjonalnych ogólnego przeznaczenia, które zostało wyprodukowane w firmie Sint-Gobain (Francja). Do celów porównawczych przygotowano identyczne ściernice, tylko ze ścierniwem o 100% zawartości czystego elektrokorundu Al_2O_3 .

Wszystkie ściernice (po 3 sztuki dla każdej twardości) wykonane zostały metodą półtechniki w Laboratorium Inżynierii Materiałowej Politechniki Koszalińskiej. Do wiązania ścierniwa w wytwarzanych narzędziach zastosowano, opracowane w tym laboratorium, spoiwo szklanokryształiczne odmiany „DH1”[35].

Eksperyment badawczy przeprowadzono na specjalnie zbudowanym stanowisku (na bazie szlifierki uniwersalnej typu RUP 28 x 500) [139]. Napęd ściernicy stanowiło elektowrzeciono firmy FISCHER typ EV-70/70-2WB. Umożliwiało ono szlifowanie z prędkościami obrotowymi do 60 tys. obr/min. Zastosowana przetwornica częstotliwości SIEB&MEYER, typ 21.60, służyła do zasilania i sterowania elektowrzecionem. Program TERM51 nadzorował parametry pracy elektowrzeciona. Szlifowano wewnętrzne powierzchnie omawianych wcześniej pierścieni łożyskowych typu 1208. Szlifowanie prowadzono do osiągnięcia ubytku materiału $V_w = 3000 \text{ mm}^3$.

Podczas badań dokonywano pomiaru: wydajności objętościowej V_w , zużycia promieniowego ściernicy Δ_{rs} , maksymalnej mocy skrawania P_c oraz chropowatości szlifowanej powierzchni Ra . Pomiar mocy rejestrowany był z czujników wbudowanych w strukturę stosowanego elektrowrzeciona. Pomiar zużycia promieniowego ściernicy dokonywano na pionowym długościomierzu Abbego z dokładnością 0,001mm. Do określenia parametrów chropowatości szlifowanej powierzchni użyto profilografometru ME 10 firmy Carl Zeiss Jena, współpracującego z komputerem IBM (błąd wskazania: $\pm 4\%$, zakres pomiaru urządzenia wodzącego: $\pm 100 \mu\text{m}$, końcówka igły wodzącej: diament 90° , promień końcówki igły wodzącej: $\leq 2 \mu\text{m}$).

Proces obróbki prowadzono przy następujących warunkach: prędkości obrotowe ściernicy: $v_s = 35 \text{ m/s}$, $v_s = 45 \text{ m/s}$ i $v_s = 60 \text{ m/s}$, dosuw: $a = 0,01 \text{ mm}$, chłodzenie 3-procentowym olejem emulgującym (Cimtech D18), strumieniem mieszaniny doprowadzanym swobodnie. Każdą próbę powtarzano 3-krotnie. Warunki obciążania ściernic: obciążacz diamentowy jednoziarnisty o masie diamentu 0,5 kr, dosuw obciążacza $a_d = 0,005\text{-}0,01 \text{ mm}$, posuw $f_d = 0,02\text{-}0,05 \text{ mm/obr}$, bez chłodzenia).

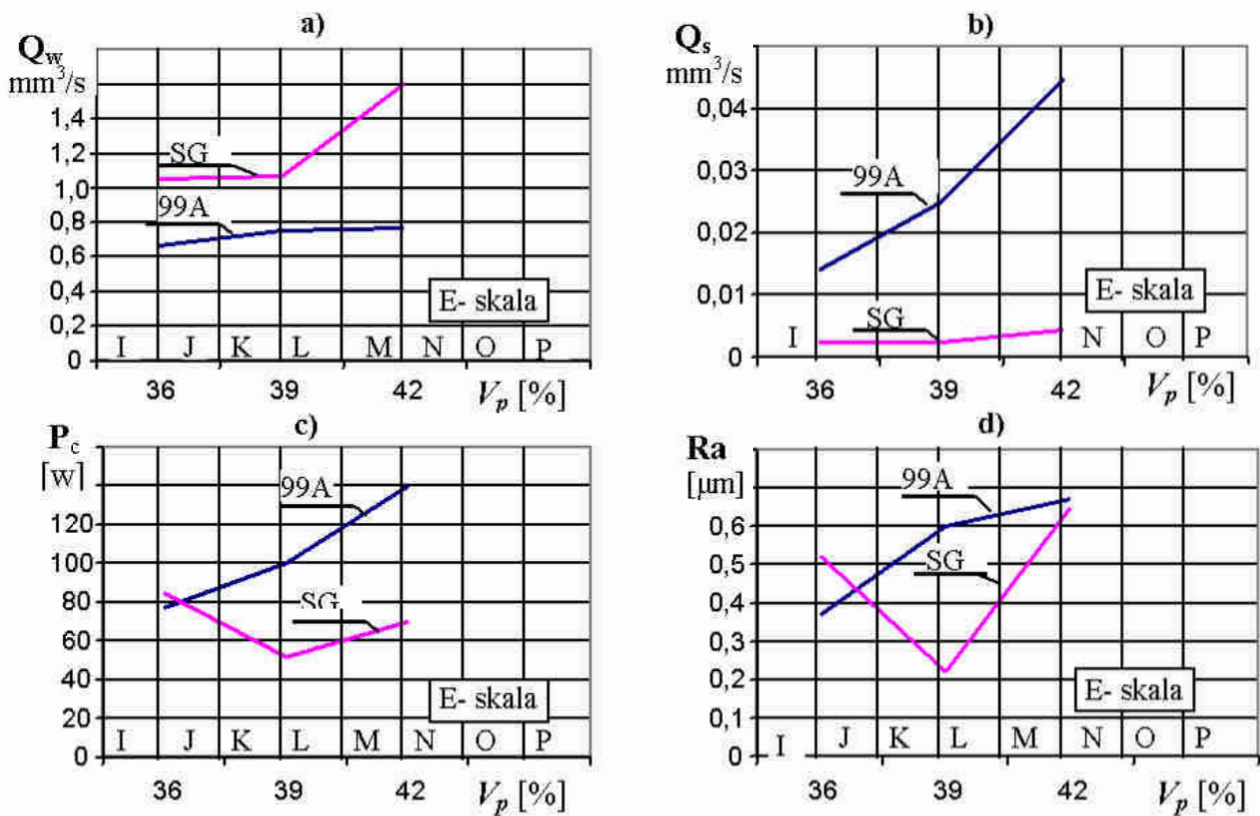
Uśrednione wyniki przyjętych do oceny parametrów eksploatacyjnych z badań ściernic (przy różnych prędkościach ściernicy v_s) podano w tab. XXI.

Tab. XXI. Uśrednione wyniki parametrów eksploatacyjnych badanych ściernic

Tab. XXI. Averaged results of operating parameters of investigated grinding wheels

Ściernice	1C-25x10x10/99A80J-NV(DH)			1C-25x10x10/SG80J-NV(DH)		
Twardość	J	L	N	J	L	N
Q_w [mm ³ /s]	0,767	0,748	0,660	1,60	1,07	1,05
Q_s [mm ³ /s]	0,045	0,025	0,014	0,0043	0,0024	0,0023
P_c [W]	77	100	140	70	51,3	84,8
Ra [μm]	0,67	0,60	0,37	0,65	0,22	0,52
G	16,86	29,92	47,14	372,1	446,0	457,0

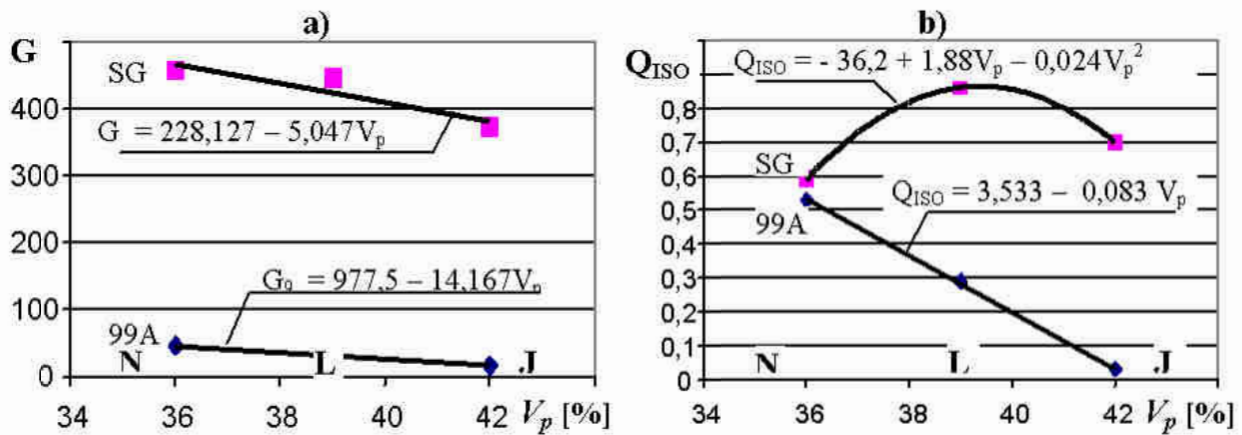
Graficzny obraz otrzymanych wyników dotyczących wydajności ubytkowej Q_w zaprezentowano na rys. 123a, intensywności zużycia badanych ściernic na rys. 123b, maksymalnej mocy skrawania P_c na rys. 123c oraz chropowatości szlifowanej powierzchni na rys. 123d.



Rys. 123. Wpływ rodzaju ścierniwa na wskaźniki jakości użytkowej ściernic
Fig. 123. The effect of the abrasive material type on functional quality indices of grinding wheels

Z przedstawionych zależności wynika, że zastosowanie do procesu szlifowania ściernic ze ścierniwem SG przynosi korzystne efekty w zakresie wszystkich wziętych pod uwagę parametrów oceny jakości użytkowej. Szczególnie istotna różnica występuje w zakresie zużycia ściernic (rys.123b). W odniesieniu do ścierniwa elektrokorundowego wyniki różnią się bowiem o rząd wielkości. Ma to odniesienie w stosunku do takiego podstawowego wskaźnika efektywności procesu, jakim jest wskaźnik szlifowania G (rys.124a), wyraża on bowiem stosunek ubytku materiału do zużycia objętościowego ściernicy w tym samym czasie. Do pełnej oceny jakości użytkowej badanych ściernic celowe jest także uwzględnienie i pozostałych wskaźników danego procesu. Korzystając z funkcji porządkującej, opisaney wzorem 85, sprowadzono je na jedną wspólną skalę i wyliczono unormowany parametr oceny jakości użytkowej Q_{ISO} . Jego wartości przedstawiono na rys. 124b.

Z porównania wartości wskaźnika szlifowania G dla ściernic z konwencjonalnego ścierniwa (99A) i zmodyfikowanego, przez dodanie 50% ziaren SG, wynika, że efektywność procesu szlifowania ściernicami z SG jest 5-krotnie wyższa niż ściernicami elektrokorundowymi. Efektywność ta wzrasta, zarówno dla jednego jak i drugiego ścierniwa, w miarę wzrostu twardości ściernic – rys. 124a.



Rys. 124. Wskaźniki efektywności procesu szlifowania ściernicami ze ścierniwa konwencjonalnego (99A) oraz modyfikowanego korundem spiekany (SG)

Fig. 124. Indices of grinding process efficiency with grinding wheels made of conventional abrasive material (99A) and modified with sintered alumina (SG)

Oceniając efektywność procesu według unormowanego wskaźnika oceny jakościowej Q_{ISO} , ujmującego wszystkie badane parametry eksploatacyjne, można zauważyć, że wszystkie ściernice z ziarnem SG mieszczą się w zakresie stanów dobrych i bardzo dobrych ($Q_{ISO} > 0,6$). W przypadku ściernic z konwencjonalnym ścierniwem o dobrej jakości użytkowej można mówić tylko w odniesieniu do twardości N . Osiąga on porównywalną wartość wskaźnika Q_{ISO} , tak jak ściernica ze ścierniwa modyfikowanego. To zbliżenie wartości tego wskaźnika wynika z faktu, iż przyjęte parametry obróbki nie były wystarczające dla przebiegu mikrowykruszania ziaren ściernych (istotnej charakterystyki tego rodzaju ścierniwa) i nie następował proces samoostrzenia się. Objawem tego była większa chropowatość szlifowanej powierzchni, która spowodowała obniżenie wartości wskaźnika Q_{ISO} w stosunku do ściernicy o mniejszej twardości.

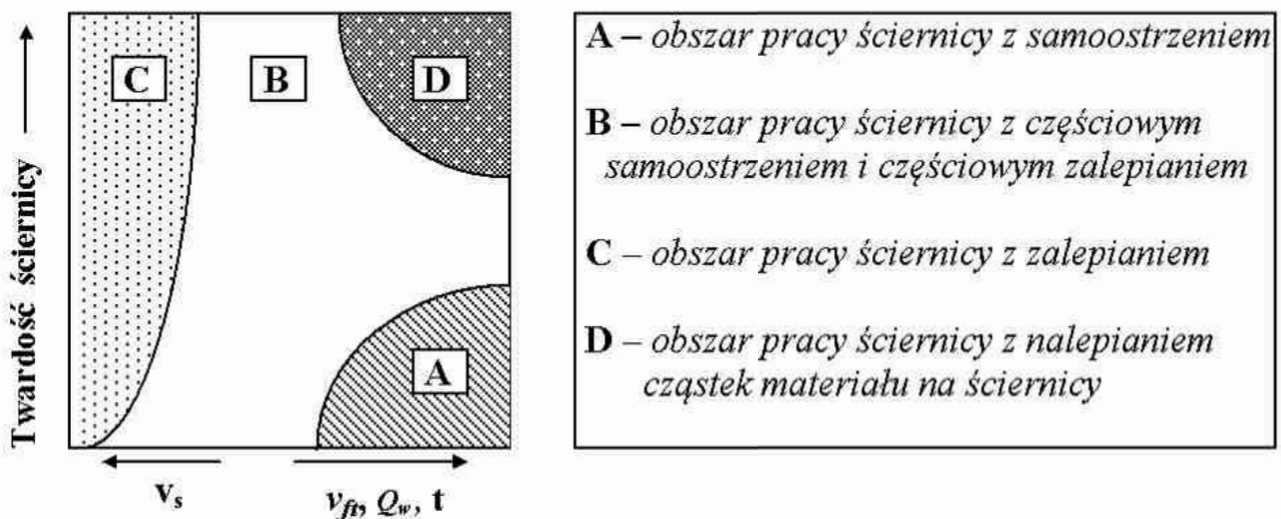
Podaje się, że do oceny efektywności procesu szlifowania winno się stosować wskaźnik efektywności szlifowania E_s , (będącego stosunkiem wskaźnika szlifowania do właściwej mocy czynnej P'_{sc}) [95]. Wyznaczono zatem wartość tego wskaźnika i przeprowadzonej analizy porównawczej wynika, że przebieg funkcji $E_s = f(V_p)$ jest jakościowo zbieżny z przebiegiem badanych zależności według unormowanego wskaźnika Q_{ISO} . Wskazuje to na adekwatność występujących zjawisk, niezależnie od rodzaju stosowanych wskaźników.

W świetle przeprowadzonych rozważań, dotyczących wpływu charakterystyki technicznej narzędzia ściernego na niezawodność, można postawić generalny wniosek, że twardość ściernicy jest tym parametrem, za pomocą którego najłatwiej i najskuteczniej jest uzyskiwać wzrost niezawodności systemu operacyjnego obróbki szlifowaniem.

6.4. Doskonalenie systemu przez zmianę parametrów obróbki

Efektywność i wydajność to dwa najważniejsze aspekty każdego przemysłowego procesu realizacji. Efektywność opiera się na racjonalności, a ta oznacza, że dane działanie jest poznawczo ugruntowane poziomem wiedzy w danym zakresie i wynikającymi z niej zaleceniami praktycznymi.

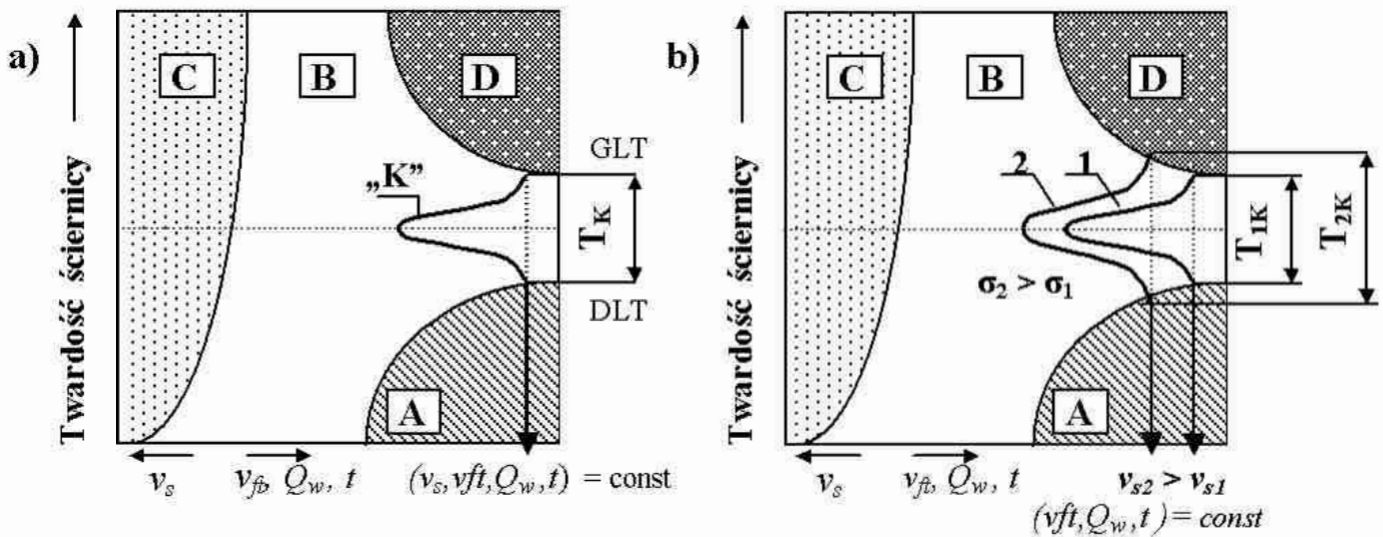
Jak wykazano wcześniej, poprawę efektywności procesu szlifowania można uzyskać przez modyfikację budowy strukturalnej ściernicy oraz ich selekcję jakościową. Nie wyczerpuje to jednak wszystkich możliwości działania w tym kierunku. Ściernica bowiem, jako element większej całości (systemu), podlega regułom działania tej całości. Jeżeli zatem zmieniają się te reguły (prawa działania), może się też zmienić użyteczność określonego elementu w nowej sytuacji. Takimi podstawowymi „regułami gry systemowej” w obszarze obróbki szlifowaniem są parametry obróbki. Określają one bowiem charakter pracy ściernicy – rys. 125 [80].



Rys. 125. Obszary występowania różnych mechanizmów zużywania się i tępienia ściernicy w zależności od jej twardości i parametrów szlifowania [80]

Fig. 125. Regions of the occurrence of the different mechanisms of wearing and glazing of grinding wheels depending on their hardness and grinding parameters

Dla danego układu parametrów obróbki występuje określony obszar zachowań eksploatacyjnych ściernicy. Zmieniając ten układ zmienia się jej zachowanie. Elementem wymuszającym te zmiany jest dążność do zwiększenia efektywności procesu. Podano wcześniej, że u podłoża tej efektywności leży zwiększanie twardości narzędzi ściernych. Dobór twardości zależy od przewidywanych obciążeń, a te związane są bezpośrednio z stosowanymi parametrami obróbki. Szczególnie interesujące w tym zakresie jest oddziaływanie prędkości obwodowej ściernicy – rys. 126.



Rys. 126. Schemat do analizy wpływu rozrzutu twardości ściernic na charakter ich pracy: a) przy stałej prędkości v_s , b) przy różnej v_s

Fig. 126. Diagram for analysis of the effect of the scatter of grinding wheel hardness on the operational characteristics: a) at constant speed v_s , b) at different v_s

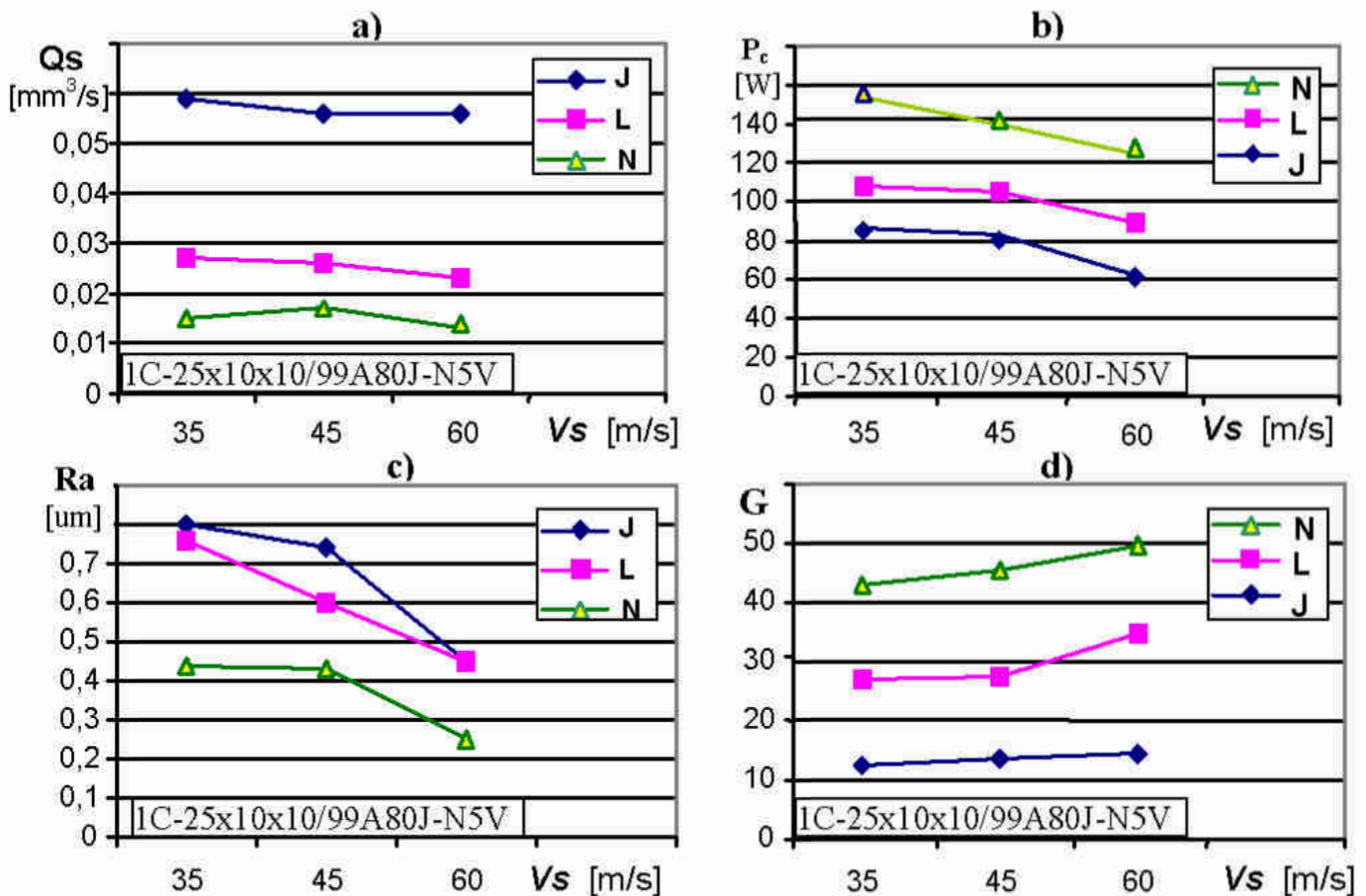
Jeżeli ściernica o przykładowej twardości „K” ma szlifować ze stałą wydajnością ($Q_w = const$), którą zapewnia dany układ parametrów obróbki, to dopuszczalny rozrzut jej twardości (nie zmieniający charakteru jej pracy) ma się mieścić w zakresie tolerancji ($T_K = 6\sigma_{n-1}$) – rys. 126a.

Jeżeli zwiększy się prędkość obwodową ściernicy z v_{s1} do v_{s2} , to można oczekiwać, że znacznie większy rozrzut twardości ściernic ($T_{2K} > T_{1K}$), mierzony odchyleniem standardowym σ_{n-1} , nie wpływa na zmianę charakteru ich pracy – rys.126b. W praktyce warsztatowej zjawisko to określa się potocznie jako „pozorne utwardzenie ściernicy”. Próbowano też je definiować jako: „twardość dynamiczna” i stosować określone sposoby jej pomiaru [53].

W rozpatrywanym obszarze obróbki ściernic (szlifowanie obwodowe wewnętrznych powierzchni walcowych), która wykonywana jest najczęściej jako obróbka powtarzalna (np. przemysł łożyskowy, samochodowy) nadal wykorzystuje się duże liczby ściernic o konwencjonalnej budowie. Jak wcześniej wykazano, narzędzia te z natury swojej charakteryzują się dużym rozrzutem swojej twardości (rzędu 2-3 klas wg E -skali) i taki charakter oddziaływania zmiany prędkości v_s powinien być bardzo korzystny dla przebiegu procesu obróbki. Nie są natomiast tak korzystne dla tego procesu zmiany pozostałych parametrów obróbki (styku wglębnego oraz posuwu osiowego). Ich zwiększanie zwiększa przekrój warstwy skrawanej, a to pociąga za sobą zapotrzebowanie mocy skrawania. Zmniejszenie tych parametrów prowadzi natomiast do mniejszej wydajności operacyjnej. Stwierdzono na przykład, że w przypadku badanej operacji (szlifowania pierścieni łożyskowych typu 1208) zwiększenie czasu maszyno-

wego operacji $t_m = 48$ [s] tylko o 10%, dawało dzienną stratę wydajności wynoszącą 120 sztuk tych pierścieni [135]. W dalszej analizie skoncentrowano się zatem tylko na rozpatrzeniu wpływu prędkości obwodowej ściernicy na efektywność procesu. W tym celu przeprowadzono eksperyment badawczy z wykorzystaniem stanowiska i metodyki omówionej w poprzednim podrozdziale.

Badaniom poddano ściernice małogabarytowe o charakterystyce: 1C-25x10x10/99A80J...N5VD, wykonane metodą półtechniki w Laboratorium Inżynierii Materiałowej Politechniki Koszalińskiej (po 9 sztuk dla każdej próby) [83]. Do wiązania ścierniwa w narzędziach zastosowano opracowane w tym laboratorium spoiwo szklanokrystaliczne gatunku DH1. Do oceny jakościowej badanych ściernic wykorzystano omawiane wcześniej: zużycie promieniowe ściernicy Δ_{rs} , maksymalną moc skrawania P_c oraz chropowatość szlifowanej powierzchni, mierzoną parametrem Ra . Uzyskane zależności pokazano graficznie na rys.127.

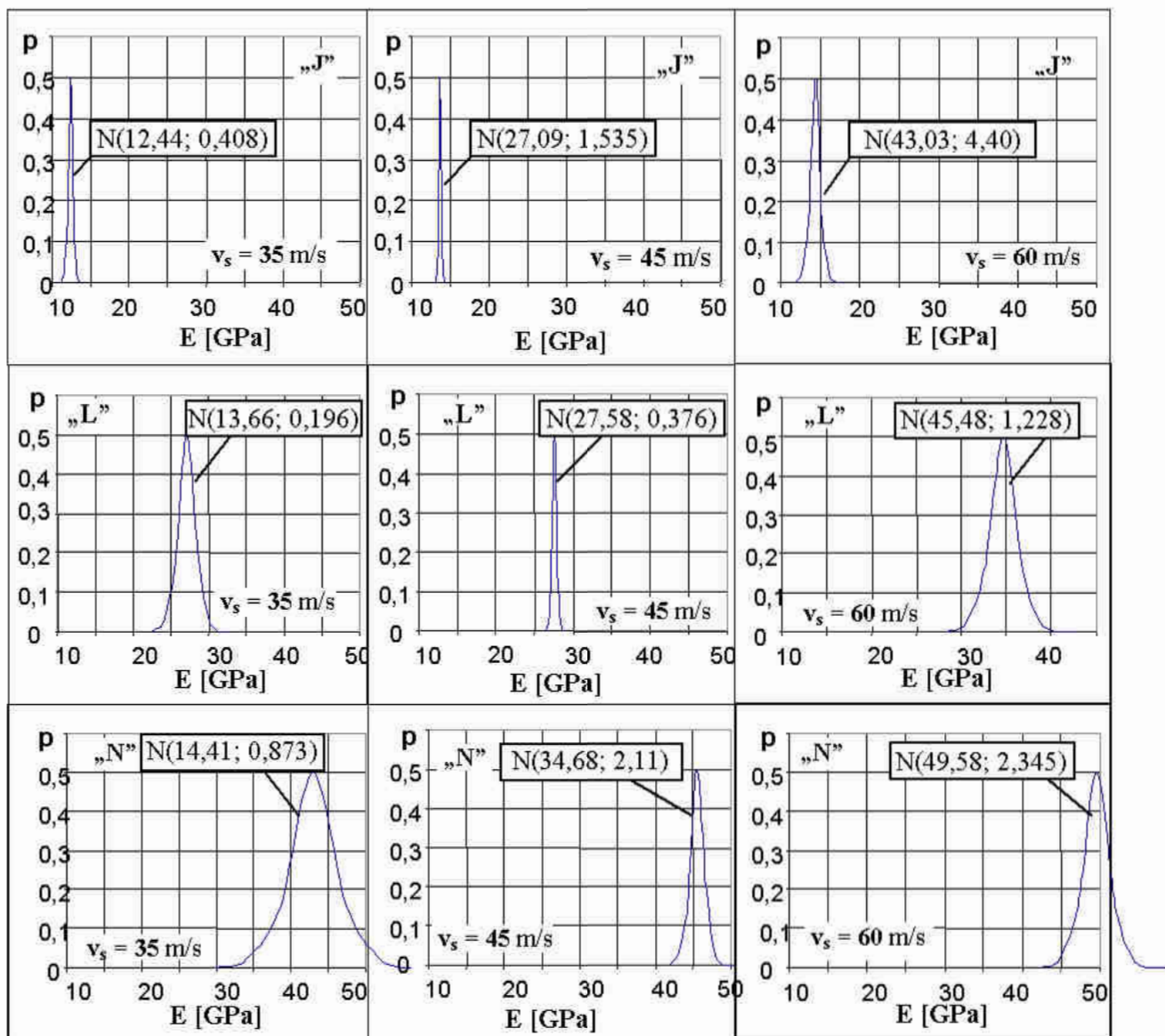


Rys. 127. Wpływ prędkości obwodowej ściernicy v_s na wskaźniki eksploatacyjne
Fig. 127. The effect the grinding wheel peripheral speed v_s the operating indices

Z przedstawionych wykresów wynika, że istnieje korzystny wpływ prędkości obwodowej ściernicy v_s w zakresie wszystkich analizowanych wskaźników jakości użytkowej: rośnie wskaźnik szlifowania (rys.127d), a maleje zapotrze-

bowanie mocy skrawania (rys. 127b), chropowatość szlifowanej powierzchni (rys. 127c) oraz intensywność zużycia ściernicy (rys. 127a). Ten ostatni parametr jest jednak bardziej uzależniony od twardości ściernic (szczególnie w zakresie niskich klas wg skali Nortona) niż od prędkości obwodowej. Największym zużyciem charakteryzuje się ściernica o twardości J, a jednocześnie wykazuje ona największe zapotrzebowanie mocy na skrawanie (rys.127b). Oznacza to, że ściernica ta pracuje w obszarze dużego samoostrzenia się (obszar A na rys.125). Przydatność tej ściernicy do danego procesu jest mała. Dowodem na to jest niska wartość wskaźnika G (rys. 127d).

Rozkład tego wskaźnika zależny jest zarówno od prędkości v_s ściernicy jak i jej twardości. Rozproszenie wyników zwiększa się wraz ze wzrostem tych parametrów, co zobrazowano na rys. 128.

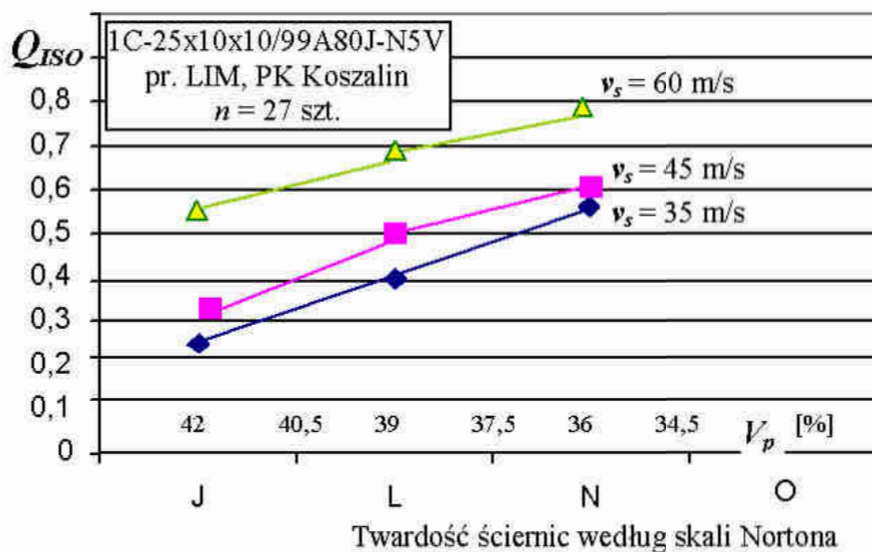


Rys. 128. Wpływ prędkości ściernicy v_s na rozkłady wskaźnika szlifowania G

Fig. 128. The effect of the grinding wheel speed v_s on the distribution of the grinding ratio G

Najmniejsze rozrzuty występują dla ściernic o twardości „J”, co (zgodnie z rys. 125) świadczyłoby o tym, że wzrost prędkości v_s nie spowodował dla tej grupy ściernic zmiany charakteru pracy i pozostają one nadal w obszarze (B) częściowego samoostrzenia i częściowego zalepiania się. W przypadku ściernic o twardości N (częściowo też i L) zwiększone rozkłady G wraz ze wzrostem prędkości v_s oznaczają, że charakter pracy tych narzędzi jest nieustabilizowany.

Jest to wynikiem tego, że zastosowane parametry obróbki powodują obciążenie ziaren sprzyjające pracy ściernic na granicy obszarów B, C (rys.125), Wskazuje to na fakt, iż twardość ściernicy odgrywa istotną rolę w jej eksploatacyjnych zachowaniach się. Potwierdzają to wyliczone wartości systemowego wskaźnika Q_{ISO} pokazane na rys. 129.



Rys. 129. Współzależność systemowego wskaźnika oceny jakości użytkowej Q_{ISO} od twardości ściernicy oraz ich prędkości obwodowej v_s podczas szlifowania

Fig. 129. Interrelation between the system index of functional quality assessment Q_{ISO} , the grinding wheel hardness and their peripheral speed v_s while grinding

Przedstawione dane wskazują, że wskaźnik jakości użytkowej ściernicy Q_{ISO} ma charakter systemowy, ponieważ jego wartość zależy od zintegrowanego zachowania się narzędzia w określonym systemie operacyjnym. Wzrost prędkości obwodowej v_s prowadzi do polepszenia jakości użytkowej ściernicy, a tym samym sprzyja większej niezawodności systemu operacyjnego. Zmiana prędkości v_s zwykle jednak wymaga dość istotnych zmian w konstrukcji szlifierki. Wartościowo taki sam wzrost wskaźnika jakości użytkowej ściernicy Q_{ISO} można uzyskać przez zwiększenie ich twardości. Zmiana ta nie wymaga modernizacji systemu operacyjnego, a jedynie zamówienia narzędzia ściernego o właściwej charakterystyce. Należy tylko wiedzieć, jaka ma ona być. Ustalenie sposobu podejścia do tego zagadnienia było przedmiotem niniejszej rozprawy.

PODSUMOWANIE

Nauka potrzebuje liczb, a sterowanie powiązania ich ze sobą. Użytkownik potrzebuje jakości wyrobu, a producent powiązania jej z opłacalnością produkcji. Zintegrowanie tego w jedną całość, wymaga podejścia systemowego. **Podejście systemowe** ukazuje pewną nową perspektywę w badaniach rzeczywistości przyrodniczej, technicznej i społecznej. Stanowi też nowy sposób zorganizowania uzyskanych wyników badawczych przy użyciu pojęć systemu, oraz systemowych własności i relacji.

Podejście takie zastosowano w niniejszej pracy do oceny jakości ściernic o spoiwie ceramicznym. Jakość bowiem nie jest zagadnieniem abstrakcyjnym, czysto teoretycznym, ale czymś realnym, co powstaje po zetknięciu się cech obiektu z potrzebami odbiorcy.

Ściernice są obiektami zadaniowymi. Oznacza to, że projektowane i wykonywane są, zasadniczo, pod potrzeby określonego użytkownika i wykorzystywane do bardzo różnorodnych operacji obróbki szlifowaniem. Charakteryzują się dużą rozpiętością swoich kształtów, rozmiarów oraz niejednorodnością budowy strukturalnej. Niejednorodność ta wpływa w sposób istotny na ich jakość. Jest ona szczególną cechą różnicującą te narzędzia, jako środki techniczne, pod względem ich zdolności wypełniania zadań w systemie operacyjnym obróbki szlifowaniem. Z tego też względu do oceny tego typu obiektów uprawnione, a w istocie rzeczy najbardziej słuszne, jest ujęcie systemowe.

W ujęciu tym ocenę jakości należy rozumieć w szerokim kontekście strategii projakościowych, obejmujących: zarządzanie przez fakty, zarządzanie przez cele oraz zarządzanie procesowe. Celem takiej oceny jest maksymalizacja efektów użytkowych, uzyskiwanych z każdego egzemplarza ściernicy i całych partii tych narzędzi. Uzyskanie tego celu jest tym bardziej prawdopodobne, im większą stabilnością wykazuje się system. Systemy operacyjne obróbki szlifowaniem na ogół charakteryzują się brakiem takiej stabilności, co pogarsza jakość wyrobów i utrudnia jej prognozowanie. Ten brak stabilności systemu związany jest głównie z niestabilnością narzędzia ściernego. Dotyczy to zwłaszcza rozpatrywanych ściernic ceramicznych. W związku z tym, w pracy należało:

1. wyspecyfikować problem zmienności istotnych cech budowy i poznać ich rozproszenie;
2. zbadać możliwości utrzymania określonego stanu tego rozproszenia;
3. wypracować warunki doskonalenia systemu operacyjnego.

Metodologia systemowa zaleca, by przy badaniach systemu, jak i każdego jego elementu, zawsze nawiązywać do własności systemu jako całości, do jego

struktury, oraz do jego funkcji i ewolucji. Przy takim podejściu do jakości oprócz zrozumienia „struktury statycznej” (subobszary i wagi), niezbędne było zrozumienie „struktury dynamicznej”. Struktura ta jest efektem procesu transformacji stanów jakości na poszczególnych fazach życia badanego wyrobu. Odbywa się ona w sferze świadomości i dotyczy przewartościowania kryteriów oceny. Przewartościowania te wynikają z różnych priorytetów i różnych racji. Ważne było zatem rozstrzygnięcie: jaka racja przyświeca danej ocenie i jaki jest jej cel?

Umiejętność kierowania się racjami polega na dążeniu do jedności układu kryteriów, a jedność ta wystąpi wtedy, gdy reprezentowane są wszystkie racje. W przedstawionej pracy racje te zostały wyartykułowane w postaci definicji operacyjnych, obejmujących: metodę badania, kryteria i decyzję. W ten sposób rozpracowany został systemowy (podmiotowo-celowy) charakter oceny (co?, po co?, dlaczego?).

Podstawowym zadaniem prowadzonej systemowej oceny jakości było dostarczenie modeli postępowania w postaci syntetycznych mierników (wskaźników) jakości, które spełniając warunek formalnej poprawności, dawałyby merytoryczne uzasadnienie działań korygujących lub zapobiegawczych w danym procesie. Celem mierników jest wymierna ocena realizacji określonego rozwiązania (koncepcji projektowej), bowiem w działaniach projakościowych, niezależnie czego by one nie dotyczyły, wszystko zaczyna się od koncepcji, którą potem trzeba uchwycić w „rygory liczb”.

Przeprowadzone rozważania poparte wynikami badań potwierdziły tezę o szczególnej przydatności dynamicznego modułu E jako miernika oceny jakości projektowej i jakości wykonania badanych narzędzi. Jest on bowiem nie tylko *miarą wynikową*, dotyczącą tego co się już zdarzyło (na etapie projektowania i wytwarzania narzędzia), ale także *miarą prognozującą* – wybiegającą w przyszłość (mającą bardziej charakter jakościowy niż ilościowy), informującą w jaki sposób to, co się już zdarzyło, może mieć wpływ na funkcjonowanie narzędzia w przyszłości. Do wyznaczenia wartości tego kryterium opracowano zestaw metod badawczych, opartych na nieniszczących pomiarach częstotliwości drgań własnych badanych narzędzi.

Zastosowane podejście badawcze, oparte na ujęciu systemowym, pozwoliło na osiągnięcie ładu myślowego i spójności w zakresie merytorycznym i strukturalnym. Cała struktura pracy opiera się bowiem na trójelementowym układzie systemowym: 1) cele, 2) metody, 3) realizacja.

Cel poznawczy pracy dotyczył możliwości oceny jakościowej ściernic ceramicznych za pomocą jednego syntetycznego parametru budowy strukturalnej tych narzędzi, jakim jest moduł sprężystości wzdłużnej E .

Cel utylitarny związany był z możliwością wykorzystania modułu E do prognozowania zachowań eksploatacyjnych badanych narzędzi.

Cel naukowy – twórczy wkład autora w naukę – sprowadzał się do wykrycia i zdefiniowania określonych prawidłowości w obszarze prowadzonych badań, przez zastosowanie systemowego i probabilistycznego podejścia do zagadnień.

Wszystkie postawione cele zostały spełnione. Zbudowano model oceny jakościowej narzędzi ściernych, w miękkiej technice systemowej, opracowano metodykę i aparaturę badawczą do badania przyjętego kryterium pomiarowego, przeprowadzono określone eksperymenty badawcze, opracowano wyniki badań zgodnie z regułami pracy naukowej.

Uzyskane prawidłowości mogą być podstawą formułowania praw naukowych II rodzaju (opartych na statystyce), ponieważ prowadzony eksperyment obejmował odpowiednio duży materiał badawczy. W zakresie powiązań pomiędzy budową strukturalną ściernic i procesem ich wytwarzania a modułem E **przebadano ogółem 2954 sztuk narzędzi**, należących do 427 partii o różnej charakterystyce. Przy określaniu powiązań pomiędzy modułem E a parametrami eksploatacyjnymi procesu przeprowadzono proces obróbki w powtarzalnych warunkach (automat szlifierski) przy użyciu 253 sztuk narzędzi, należących do 28 partii o różnej charakterystyce.

Opracowano metodykę wyznaczania modułu E dla trzech grup rodzajowych ściernic: tarczowych, małogabarytowych oraz kształtowych. Opracowana technika pomiarowa (niskiej, średniej i wysokiej częstotliwości) wywodzi się z grupy metod akustycznych, jest zróżnicowana aparaturowo, ale ideowo spójna. Przetestowano opracowaną metodykę i aparaturę pomiarową na dużej liczbie ściernic i w zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych.

Badania doświadczalne prowadzono na ściernicach o charakterystykach celowo zaprojektowanych do danego eksperymentu, jak wykonywanych przemysłowo na potrzeby różnych użytkowników. Program badań obejmował ściernice producentów krajowych i zagranicznych, wykonywane w sposób przemysłowy i laboratoryjnych, w różnych ośrodkach badawczych.

Badaniom poddano ściernice ceramiczne o konwencjonalnej charakterystyce technicznej, a także o zmodyfikowanym ziarnie ściernym i zmodyfikowanym spoiwie. Eksperymentem badawczym objęto także ściernice z mikrokryształicznego korundu spiekanego SG, jako przyszłościowej grupy narzędzi ściernych. Eksperyment badawczy prowadzono zarówno przy konwencjonalnym postępowaniu badawczym, jak i przy wykorzystaniu techniki planowania doświadczeń.

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące **wnioski ogólne**:

1. Moduł Younga ściernic ceramicznych jest czułym miernikiem zmian w ich budowie strukturalnej oraz procesie wytwarzania.

2. Pomiedzy własnościami sprężystymi a udziałem objętościowym por V_p , będącym podstawą twardości ściernic o spoiwie ceramicznym, istnieje silna zależność liniowa, która może być wykorzystana do ustalenia skali wartości normatywnych modułu E .
3. Wpływ udziału objętościowego ziaren SG w ścierniwie na moduł E ściernic ceramicznych jest niejednoznaczny. Maksymalną wartość osiąga dla mieszanki składającej się w 50% z ziaren Al_2O_3 i ziaren SG.
4. Zastosowanie spoiw szklanokrystalicznych do wykonywania ściernic ceramicznych wpływa na wzrost wartości modułu E tych narzędzi.
5. W procesie wytwarzania ściernic ceramicznych istnieje duża zmienność procesowa, powodująca rozrzut twardości tych narzędzi, rzędu 2-3 klas wg skali Nortona. Rozrzut ten wywołany jest przyczynami losowymi i przy produkcji przemysłowej nie zależy w sposób statystycznie istotny od producenta tych narzędzi.
6. Ściernice ceramiczne pochodzące od różnych producentów mimo takiego samego oznaczenia charakteryzują się innymi własnościami mechanicznymi, co wpływa w sposób różnicujący na ich jakość użytkową. Nie należy zatem łączyć w tym samym procesie eksploatacji narzędzi ściernych różnych producentów.
7. Moduł E jest dobrym kryterium badania zdolności jakościowej procesów wytwarzania ściernic ceramicznych i może stanowić podstawę sterowania tymi procesami przy użyciu kart kontrolnych SPC.
8. Znajomość rozkładu modułu E w partii narzędzi o jednakowej charakterystyce pozwala prognozować, z błędem nie większym niż 20%, niezawodność systemów operacyjnych obróbki szlifowaniem.
9. Podniesienie prędkości obwodowej ściernicy sprzyja wzrostowi niezawodności systemów operacyjnych obróbki szlifowaniem, przez neutralizację rozrzutu twardości tych narzędzi.

Autor ma nadzieję, że niniejsza praca przyczyni się do lepszego poznania właściwości eksploatacyjnych ściernic ceramicznych oraz zwiększenia zaufania klientów do kompetencji producentów tych narzędzi. Zgodnie bowiem z sentencją A. Koziarskiego, którą przyjęto jako motto niniejszej rozprawy:

*„na bardzo dobre wyroby zapotrzebowanie rośnie,
ale żeby je wytwarzać i korzystnie sprzedać,
trzeba je najpierw efektywnie badać –
badać z wyprzedzeniem”.*

SYSTEMOWA OCENA JAKOŚCI ŚCIERNIC CERAMICZNYCH

Rozprawa dotyczy ilościowej oceny jakości ściernic ceramicznych o konwencjonalnej budowie na podstawie modułu E . W ujęciu systemowym przedstawiono w niej problematykę budowy narzędzi ściernych spojonych, zwłaszcza w zastosowaniu do obróbki zautomatyzowanej. Rozpatrzono zagadnienie postępowania optymalizacyjnego w warunkach ograniczeń nałożonych na proces. Uwzględniając kinetykę procesu zbudowano model systemowej oceny jakości.

Przeanalizowano istniejące metody pomiaru twardości narzędzi ściernych i opracowano model diagnostyczny do wyznaczania tej cechy strukturalnej, z wykorzystaniem modułu E jako kryterium pomiarowego. Podano metodykę jego pomiaru metodami akustycznymi w odniesieniu do trzech różnych typów wymiarowych ściernic: tarczowych, małogabarytowych oraz kształtowych. Korzystając z opracowanej metodyki i zbudowanej aparatury, dokonano badania wpływu budowy strukturalnej ściernic ceramicznych na wartość modułu E . Badania przeprowadzono dla trzech grup rodzajowych: ściernic o konwencjonalnej budowie (wytwarzanych przemysłowo), ściernic o modyfikowanym ścierniwie i ściernic o modyfikowanym spoiwie. Wyniki badań posłużyły do opracowania skali wartości normatywnych modułu E .

Dokonano oceny wpływu procesu wytwarzania na rozrzut modułu E w partiach narzędzi o określonej charakterystyce i opracowano skalę jakości wykonania na podstawie funkcji strat Taguchiego. Przeanalizowano zdolność jakościową procesu wytwarzania narzędzi ściernych o spoiwach ceramicznych producentów krajowych i zagranicznych, korzystając z opracowanego wskaźnika zdolności jakościowej procesu Q_{ISO} . Podano przykład wykorzystania modułu E do dokumentowania zdatności procesu przy użyciu kart kontrolnych SPC.

Na podstawie wyników badań eksploatacyjnych partii ściernic o różnych charakterystykach, ustalono związki korelacyjne pomiędzy modułem E zużyciem promieniowym ściernic Δ_{rs} , maksymalną mocą skrawania P_c oraz chropowatością szlifowanej powierzchni Ra . Dokonano analizy jakości użytkowej tych narzędzi w systemie obróbki zautomatyzowanej i wyznaczono niezawodność systemu operacyjnego przy uwzględnieniu ograniczeń nałożonych na te kryteria. Korzystając z opracowanego systemu ekspertowego, ustalono przydatność użytkową ściernic różnych producentów do danej operacji obróbkowej. Wykorzystując ustalone związki przyczynowo-skutkowe, przeanalizowano możliwości zwiększenia efektywności badanego procesu przez: selekcję jakościową, modyfikację charakterystyki technicznej oraz podwyższenie prędkości obwodowej ściernic v_s . Opracowana metodyka postępowania i wyniki badań mogą być wykorzystywane do celów utylitarnych i symulacji procesów szlifowania.

SYSTEM EVALUATION OF CERAMIC GRINDING-WHEEL QUALITY

The dissertation concerns the quantitative quality assessment of commercially available ceramic grinding wheels on the basis of modulus E . Considering the system aspect, it deals with the problems connected with the structure of the bonded abrasive tools, especially in the application to automatic abrasive machining. The optimizing procedure under limitations imposed on the process was discussed. Taking into consideration the kinetics of the process, a model of system quality assessment was developed.

The present methods for testing the hardness of abrasive tools were subject to an analysis and a diagnostic model designed to determine this structural characteristic, adopting the modulus E as a measurement criterion, was developed. The methods for measurement by acoustic methods in reference to three different series of types: disk-type, small-size and shaped grinding wheels were presented. Taking advantage of the developed methods and the experimental setup, investigations on the effects of the grinding-wheel structure on the modulus E value were carried out. These investigations were made for three groups of types: conventional grinding wheels (commercially available), grinding wheels with modified abrasive material and grinding wheels with modified binder. Experimental results were used to develop the scale of nominal values of the modulus E .

The effect of the manufacturing process on the modulus E scatter in lots of tools with specified characteristics were evaluated and the workmanship quality scale on the basis of Taguchi's loss function was developed. The quality capacity of the manufacturing process for abrasive tools with ceramic binders supplied by domestic and foreign manufactures, making use of the developed index of the process quality capacity Q_{ISO} was analyzed. An example of using the modulus E to document the process ability with the SPC control cards was presented.

On the grounds of operation tests on a lot of grinding wheels with different characteristics, the correlation between the modulus E , the grinding wheels radial wear Δ_{rs} , the maximum grinding power P_c and the machined surface roughness Ra was established. An analysis of the functional quality of these tools in the system of automatic abrasive machining was carried out and the reliability of the operating system respecting the limitations imposed on these criteria was determined. Taking advantage of the developed expert system, the usability of grinding wheel from different producers for a given manufacturing process was established. Taking into consideration the established casual-effect connections,

the possibility of increasing the efficiency of the investigated process were analyzed through: the quality selection, the modification of technological characteristics and the increase in the grinding wheel peripheral speed v_s . The developed procedures and the experimental results can be used for the practical applications and the simulation of grinding processes.

BIBLIOGRAFIA

1. Abramow F.N., **Słowiński B.**: *Technologiczne i ekonomiczne aspekty szlifowania z automatyczną regulacją siły skrawania*. Mechanik 10/1977, 539–541.
2. Adamkiewicz W., Hempel L., Podsiadło A., Śliwiński R.: *Badania i ocena niezawodności maszyny w systemie transportowym*. Warszawa, Wyd. Komunikacji i Łączności, 1983.
3. Ansoff H.I., Slevin D.P.: *An Appreciation of Industrial Dynamics*. *Management Science*, vol 14, nr 7, 1968, 383–398.
4. Bartosiewicz J.: *Niezawodność narzędzi skrawających*. Warszawa, WNT, 1982.
5. Bertalanffy L.: *Ogólna teoria systemów*. Warszawa, PWN, 1984.
6. Będkowski L., Dąbrowski T.: *Właściwości użytkowe systemu antropotechnicznego jako funkcja procesu diagnostyczno-obługowego*. VIII Krajowy Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Krynica Górská, 1997. Problemy Eksploatacji nr 4/97.
7. Bokuczawa G.W., Gorszkow B.T., **Słowiński B.**: *Kierunki zwiększenia efektywności szlifowania z dużymi głębokościami*. Mat. VIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Koszalin, 1985, 17–31.
8. Borkowski J.: *Elementarne zjawiska zużycia ziaren ściernych i narzędzi ściernych*. Wyd. WSI Koszalin 1983.
9. Borkowski J., Jurkowski G., Kozłowski M.: *Metody wytwarzania nasypów i warstw ściernych o wymuszonej orientacji rozmieszczenia ostrzy*. Konf. N-T „Postępy w Technice Wytwarzania” cz. I. *Narzędzia i technologia obróbki ściernej*, Kołobrzeg 1978, 48–56.
10. Borkowski J., Reczko M.: *Dynamiczne aspekty ruchu ziaren w wysokociśnieniowej strudze hydrościernej*. Mat. XII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Poznań 1989, 45–50.
11. Brunarski L., Runkiewicz L.: *Podstawy i przykłady stosowania metod niszczących w badaniach konstrukcji z betonu*. Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa, 1983.
12. Cempel C.: *Wibroakustyka stosowana*. Warszawa, PWN, 1989.
13. Checkland P.: *Information Systems and SystemsThinking: Time to Unite?* *International Journal of Information Management*, vol 8, 1988, 239–248.
14. Colwell L.V., Lane R.O., K.N.Soderlund K.N.: *On determining the hardness of grinding*. *Journal of Engineering for Industry*. T.1. nr 4/1962, 113–126.

15. Ćieślak M. (red): *Prognozowanie gospodarcze. Metody i zastosowania*. Warszawa, PWN, 1997.
16. Dahlgaard J.J., Kristensen K., Kanji G.K.: *Podstawy zarządzania jakością*. Warszawa, PWN, 2001.
17. Dietrych J.: *System i konstrukcja*. Warszawa, WNT, 1985.
18. Drucker P.: *Praktyka zarządzania*. Wyd. Czytelnik, Nowoczesność, AE w Krakowie, 1994.
19. Dwiliński L., Smalko Z., Szumiak J.: *Inżynieria materiałowa w problematyce niezawodności maszyn*. Warszawa, PWN, 1976.
20. Dwiliński L.: *Zarządzanie jakością i niezawodnością wyrobów*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000.
21. Findeisen W. (red): *Analiza Systemowa. Podstawy Metodologiczne*. Warszawa, PWN, 1985.
22. Fiks W.: *Wytrzymałość ściernic ze spoiwem ceramicznym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej nr 895. Seria Rozprawy Naukowe, Łódź 2002.
23. Fung Y.C.: *Podstawy mechaniki ciała stałego*. Warszawa, PWN, 1988.
24. Gasparski W.: *Projektowanie. Konceptyjne przygotowanie działań*. Warszawa, PWN, 1978.
25. Gaussens J.: *Problemy decyzji w badaniach i pracach rozwojowych*. Warszawa, WNT, 1975.
26. Ginter J.: *Fizyka fal*. Warszawa, PWN, 1993.
27. Göttner R.: *Badania operacyjne – oczekiwania i zastosowania*. Warszawa, PWE, 1975.
28. Głagovskij B.A., Moskovjenko I.B., Rybakov V.A.: *Verfahren und Gerat zur Härteprüfung von kleiner Schleifwerkzeugen*. *Materialprüf*, t.15, nr 9, 1973, 316–319.
29. Głagovskij B.A., Moskovienko J.B.: *Niskočastotnyje akustičeskije metody kontrolia v mašinostrijenii*. Leningrad, Wyd. Mašinostrojenije, 1977.
30. Góralski A.: *Twórcze rozwiązywanie zadań*. Warszawa, PWN, 1989.
31. Hamrol A., Mantura W.: *Zarządzanie jakością. Teoria i praktyka*. Warszawa–Poznań, PWN, 1998.
32. Harasymowicz J.: *Twardość dynamiczna ściernic*. Mat. Międzynarodowej Konferencji N-T w Maribor, Techniki szlifowania 1973, 18–19.
33. Harasymowicz J., Wantuch E.: *Systemologiczna analiza pary roboczej narzędzie – przedmiot obrabiany w procesie obróbki szlifowaniem*. *Archiwum Technologii Budowy Maszyn*, z 3 /4, Poznań 1984.

34. Helwig Z. (red): *Zarys ekonometrii*. Warszawa, PWE, 1973.
35. Herman D.: *Budowa i właściwości ceramicznych narzędzi ściernych z udziałem krzemianowych spoiw szklanych i szklanokrystalicznych*. Monografia nr 54 Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 1995.
36. Herman D., Plichta J., Karpiński T.: *Effect of glass – crystalline and amorphous binder application to abrasive tools made of microcrystalline alumina grains type SG*. *Wear*, 209/1997, 213–218.
37. Herman D., **Słowiński B.**: *Wpływ mikrostruktury mostka wiążącego ziarna ściernie na wybrane wskaźniki właściwości eksploatacyjnych narzędzi ściernych*. *Mat. XX Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej*, Poznań 1997, 255–258.
38. Herman D.: *Podstawy wytwarzania i zastosowań nowych spoiw ceramicznych w narzędziach ściernych z tlenku glinu*. Koszalin, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, seria Monografie, nr 94, 2003.
39. Herman D., Markul J.: *Influence of microstructures of binder and abrasive grain on selected operational properties of ceramic grinding wheels made of alumina*. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol/Issue 44/5, 2003, 511-522.
40. Howe W.L., Martin R.H.: *Patent USA*, nr 1.983.082/1934.
41. Husserl E.: *Medytacje kartezjańskie*. Warszawa, PWN, 1982.
42. Hutt M.D., Speh T.W.: *Zarządzanie marketingiem*. Warszawa, PWN, 1997.
43. Instrukcja robocza urządzenia „GrindoSonic”. MK3 I.W. Lemmens Elektronika, Heverle, Belgia.
44. Iwasiewicz A.: *Zarządzanie jakością*. Warszawa–Kraków, PWN, 1999.
45. Jankowski E., Skupiński S.: *Materiały i wyroby ściernie*. Warszawa, WNT, 1971.
46. Jezierski J.: *Analiza tolerancji i niedokładności w budowie maszyn*. Warszawa, WNT, 2003.
47. Juchem H.O., Cooley B.A.: *Nowe zastosowanie spoiw ceramicznych – narzędzia ściernie o supertwardym ścierniwie*. Materiały V Konferencji N-T „Obróbka Ścierna – Narzędzia”, Łódź 1986.
48. Józefik W.: *Wskaźniki oceny systemów diagnostycznych*. Materiały V Kongresu Eksploatacyjnego: Sekcja III Diagnostyka Techniczna, Warszawa, 1983, 200063 – 200071.
49. Kacalak W., **Słowiński B.**: *Analiza wpływu postaci funkcji celu i warunków ograniczających na wynik optymalizacji czołowego szlifowania płaszczyzn*. *Mat. Konf. N-T „Postępy w technice wytwarzania”*. Narzędzia i technologia obróbki ścierniej. Kołobrzeg 1978, 132–145.

50. Kacalak W., Lewkowicz R., **Słowiński B.**: *Energetyczny model czółowego szlifowania płaszczyzn*. Mat. Konf. N-T „Postępy w technice wytwarzania”. Narzędzia i technologia obróbki ścierniej. Kołobrzeg, 1978, 120 – 131.
51. Kacalak W., **Słowiński B.**, Lewkowicz R., Woźniak K.: Sprawozdanie z realizacji pracy pt.: „Ocena twardości ściernic na podstawie ich własności sprężystych”, wykonane dla Polskiego Komitetu Normalizacyjnego. Koszalin 1985.
52. Kacew P. G.: *Kontrola narzędzi skrawających metodami statystycznymi*. Warszawa, WNT, 1978.
53. Kaczmarek J., Tomaszek T.: *Sposób pomiaru dynamicznej twardości ściernic i urządzenie do stosowania tego sposobu*. Opis patentowy PRL nr 58902/1969.
54. Karpiński T., Kacalak W., **Słowiński B.**: *Nowe podejście do problemu twardości narzędzi ściernych*. Mat. Konferencji N-T „Obróbka ścierna”, Łódź, 1976, 40 – 52.
55. Karpiński T., **Słowiński B.**: *Badanie twardości narzędzi ściernych metodą rezonansową*. Mechanik 3/1982, 159 - 162.
56. Karpiński T., **Słowiński B.**: *Projekt fizycznej skali twardości narzędzi ściernych o spoiwie ceramicznym*. Mat. IV Konf. N-T „Obróbka ścierna”, Łódź, 1981, 148–152.
57. Karpiński T., **Słowiński B.**: *Primienienije energii mechanicznych kolebanii dlja issledowanii twirdosti abraziwnogo instrumenta*. V Kongres Mechaniki „Teorietyczna i priłozna miechanika”. T. 4. Varna 1985, 371–376.
58. Karpiński T., **Słowiński B.**: *Stan i perspektywy rozwoju metod badania twardości narzędzi ściernych*. Mat. V Konf. „Tendencje rozwojowe w technologii maszyn”. Zielona Góra, 1987, 77–82.
59. Karpiński T., **Słowiński B.**, Pyrzyńska Cz.: Sprawozdanie ze zlecenia nr 501.02.276. II etap: „Badania porównawcze nowych narzędzi ściernych w odniesieniu do importowanych”. Koszalin, 1988.
60. Karpiński T., **Słowiński B.**, Kacprzycki Z.: *Baufehler beeinfluben die Nutzungseigenschaften bei keramischen Schleifscheiben*. Industrie-Anzeiger, 55/1989, 18–22.
61. Keller Cz., Sawka Z.: *Wpływ składu granulometrycznego ziarna ściernego na własności eksploatacyjne*. Mechanik, 12/1969, 671–673.
62. Klir G. J.: *Ogólna teoria systemów. Tendencje rozwojowe*. Warszawa, WNT, 1976.
63. Kiliński A.: *Podstawy teorii procesów realizacji*. Warszawa, Wyd. Politechniki Warszawskiej, 1972.

64. Koenig W., Follinger H.: *Elasticity modules of grinding wheel and its impact on their in-proces behaviour*. Ceramic Forum International 6-7/1987.
65. Krenz J.: *Architektura znaczeń*. Gdańsk, Wyd. Politechniki Gdańskiej, 1997.
66. Koch R.: *Zasada 80/20*. Wyd. Medium, 1998.
67. Kolman R.: *Analiza kwalitonomiczna*. Problemy jakości, nr 1–2, 1972.
68. Kolman R.: *Ilościowe określanie jakości*. Warszawa, PWE, 1973.
69. Kolman R.: *Sterowanie jakością wytwarzania*. Gdańsk, Wyd. Politechniki Gdańskiej, 1994.
70. Konieczny J.: *Inżynieria systemów działania*. Warszawa, WNT, 1983.
71. Kotarbiński T.: *Traktat o dobrej robocie*. Wyd. Ossolineum, 1975.
72. Kudła L.: *SG – Nowy gatunek materiału ściernego*. Mechanik, nr 8–9/1992, 272.
73. Kukielka S., Kukielka L.: *Planer 1.0 – komputerowy program planowania eksperymentów rozpoznawczych i właściwych i analizy modelu matematycznego obiektu badań*. (praca niepublikowana). Koszalin, Politechnika Koszalińska, 2002.
74. Latzko W.J., Saunders D.M.: *Cztery dni z dr Demingiem. Nowoczesna teoria zarządzania*. Warszawa, WNT, 1998.
75. Leon J., Frąckiewicz J.: *Systemy sprawnego działania*. Warszawa, Wyd. Antyk, 2000.
76. Leon J., Frąckiewicz J.: *Poradnik sprawnego i efektywnego kierowania*. Warszawa, Wyd. Antyk, 2000.
77. Leszek W.: *Metodologiczne podstawy badań trybologicznych*. Warszawa–Poznań, PWN, 1981.
78. Lindsay R.P.: *The performance od Seeded gel abrasive in the laboratory and customer test Sites*. Mat, Konf. Intergrind'88, Budapeszt 1988, 97–105.
79. Lis S.: *Podstawy projektowania systemu rytmicznej produkcji*. Warszawa, PWN, 1976.
80. Lurie G.D.: *Šlifovanije mettalov. Mašinostrojenije*, Moskva 1970.
81. Marciniak M.: *Proces szlifowania w ujęciu fenomenologicznym*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika z.178, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.
82. Malecki I., Polesiński Z., Rećko W.M.: *Dynamiczne i statyczne moduły sprężystości ceramiki*. Szkło i Ceramika, nr 52/2001, 2–8.
83. Markul J., **Słowiński B.**: *Efficiency Improvement in Internal Grinding*. *Archives of civil and mechanical engineering* (w druku).
84. Mazur M.: *Cybernetyka i charakter*. Warszawa, PIW, 1976.

85. Migdał M.: *Dynamiczne badania twardości ściernic za pomocą noża krążkowego*. Mat. IOS Kraków, seria „Sprawozdania”, nr 2297/II/1968.
86. Mikiel W., Kacprowski J.: *Sposób pomiaru twardości ściernic tarczowych oraz urządzenie do stosowania tego sposobu*. Opis patentowy PRL nr 53237/1965.
87. Molski M.: *Metody pomiaru drgań własnych stosowane w badaniach jakości ściernic*. Mechanik nr 11/1970, 641–645.
88. Moser M.: *Microstructures of ceramics*. Budapest, Akademiai Kiado, 1980.
89. Mudyń K.: *Zdarza się, że myślimy*. Kraków, Wyd. Profesjonalnej Szkoły Biznesu, 1997.
90. Nadler G.: *Work System Design: The Ideals – Concept*. New York 1967.
91. Neimitz A.: *Mechanika pękania*. Warszawa, PWN, 1998.
92. Norma OCT2-326-1-76. *Kontrol kačestva, nierazrušajušćij kontrol. Akustičeskij metod kontrolia fiziko – mehaničeskich svojstv abrazivnych instrumentov*. Moskva 1977.
93. Obraz J.: *Ultradźwięki w technice pomiarowej*. Warszawa, WNT, 1983.
94. Oczos K.: *Analiza procesu i metody zużycia pojedynczych ziaren ściernych i ściernic*. Rozprawy 4, Rzeszów, Politechnika Rzeszowska, 1975.
95. Oczos K., Porzycki J.: *Szlifowanie – podstawy i technika*. Warszawa, WNT, 1986.
96. Oczos K., Dul-Korzyńska B.: *Szlifowanie taśmą ścierną – stan i tendencje rozwojowe*. Mat. XV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Rzeszów 1992, 173–188.
97. Oczos K.: *Światowa Wystawa Obrabiarek EMO 99. Cz. III. Obrabiarki i narzędzia do obróbki ściernej*. Mechanik, nr 72/11/1999, 697–705.
98. Oczos K.: *Charakterystyka trendów rozwojowych szlifowania ściernicowego*. Mat. XXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Rzeszów–Myczkowice 2000, 13–62.
99. Oczos K.: *Innowacyjne procesy obróbki ściernej spojonym ścierniwem (cz.I)*: Mechanik, nr 8 – 9/2000, 531–539.
100. Oczos K.: *Innowacyjne procesy obróbki ściernej spojonym ścierniwem (cz.II)*: Mechanik, nr 10/2000, 639–649.
101. Opitz H., Peklenik J.: *Einige Bemerkungen zur bestimmung elastischer Eigenschaften von Schleifwerkzeugen*. Werkstattstechnik, nr 6, 1965, 274–276.
102. Oprzędkiewicz J.: *Podstawy niezawodności obrabiarek i systemów produkcyjnych*. Warszawa, WNT, 1989.

103. Ossimitz G.: *The Development of Systems Thinking Skills Using System Dynamics Modeling Tools*. 1997, http://www.uniklu.ac.at/users/gossimit/sdyn/gdm_eng.htm
104. Pampuch R.: *Podstawy inżynierii materiałów ceramicznych*. Warszawa, PWN, 1971.
105. Pampuch R.: *Materiały ceramiczne*. Warszawa, PWN, 1998.
106. Pasieczny L.: *Encyklopedia organizacji i zarządzania*. Warszawa, PWE, 1981.
107. Pawłowski Z.: *Badania nieniszczące*. Warszawa, Wyd. ODK SIMP, 1975.
108. Pawłow B.W.: *Diagnostyka niedomagań maszyn*. Warszawa, PWRiL, 1975.
109. Patent ZSRR nr 167057 i 226918.
110. Peters J., Snoeys R., Decneurt A.: *Sonic testing of grinding wheels*. Raport CRIF –MC 36, University of Louvain, Novembre 1970.
111. Pogorzelski W.: *Inżynieria Badań Systemowych – Prologema*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.
112. Prospekt reklamowy przyrządów typu Zvuk. Wyd. Centrum Techniczno-Handlowe „EURO-POL” w Warszawie.
113. Pszczołowski W., Rosinkiewicz P.: *Obróbka ścierna narzędziami nasypowymi*. Warszawa, WNT, 1995.
114. Ranachowski J.: *Elektroceramika t.2, Wybrane metody badań*. PWN, Warszawa–Poznań, 1982.
115. Robertson J., Robertson S.: *Pełna analiza systemowa*. Warszawa, WNT, 1999.
116. Searle J.R.: *Umysł, mózg i nauka*. PWN–Logos, 1995.
117. Senge P.: *Piąta dyscyplina – teoria i praktyka organizacji uczących się*. Warszawa, Wyd. ABC, 1998.
118. Sienkiewicz P.: *Inżynieria Systemów Kierowania*. Warszawa, PWE, 1988.
119. **Słowiński B.**: *Podstawy wyznaczania twardości ściernic metodami akustycznymi*. Prace Wydziału Mechanicznego WSIInż. Koszalin nr 6, Koszalin 1984, 69–89.
120. **Słowiński B.**: *Rezonansowa metoda pomiaru twardości ściernic ceramicznych*. Praca doktorska (nie publikowana), Wrocław, Politechnika Wrocławska, 1981.
121. **Słowiński B.**: *Wpływ budowy narzędzia ściernego o spoiwie ceramicznym na jego gęstość*. Mechanik, nr 7/1983, 415–419.
122. **Słowiński B.**: *Wpływ procesu wytwarzania ściernic ceramicznych na ich twardość i strukturę*. Mat. VII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Gdańsk 1984, 205–217.
123. **Słowiński B.**: *Prędkość propagacji fal akustycznych w narzędziach ściernych jako kryterium ich twardości*. Mat. Konf. N-T NASS’85, Kołobrzeg 1985, 98–11.

124. **Słowiński B.**: *Metodyka badania własności mechanicznych ściernic małogabarytowych metodą akustyczną*. Mechanik, nr 2/1985, 66–70.
125. **Słowiński B.**: *Badanie własności mechanicznych narzędzi ściernych z wykorzystaniem metody emisji akustycznej*. Mat. X Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Wrocław 1987, 118–125.
126. **Słowiński B.**: *Technika ultradźwiękowych badań jakości narzędzi ściernych*. Mechanik nr 3/1988, 115–119.
127. **Słowiński B.**, Rozwadowski D.: *Badanie twardości narzędzi ściernych metodą wiercenia*. Zeszyt Naukowy WSI Koszalin, nr 1/1989, 185–200.
128. **Słowiński B.**: *Zastosowanie metody ultradźwiękowej do oceny jakości wykonania ściernic małogabarytowych*. Mat. XII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Poznań–Błażejewko 1989, 231–237.
129. **Słowiński B.**: *Trwałość i niezawodność ściernic stosowanych do szlifowania pierścieni łożysk tocznych*. Biuletyn Informacyjny OBR–VIS, 2/1990, 41–42.
130. **Słowiński B.**: *Wpływ liczności próbki na dokładność wyników badań eksploatacyjnych ściernic ceramicznych*. Mat. XIV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Gdańsk 1991, 154–157.
131. **Słowiński B.**: *Podstawy prognozowania trwałości i niezawodności ściernic stosowanych w produkcji seryjnej i masowej*. Mat. Konf. „Podstawy Technologii Maszyn’91”, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej, 49/1991, 269–270.
132. **Słowiński B.**: *Metodyka badania jakości narzędzi ściernych*. Materiały XV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Rzeszów, 1992, 57–65.
133. **Słowiński B.**: *Model narzędzia ściernego w ujęciu systemowym*. Mat. XVIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Wrocław, 1995, 319–324.
134. **Słowiński B.**: *Akustyczna kontrola jakości ściernic w zastosowaniu do prognozowania ich trwałości*. Mat. XVI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Koszalin 1993, 75–85.
135. **Słowiński B.**: *Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych*. Wyd. Politechniki Koszalińskiej, 2002.
136. **Słowiński B.**: *Jakość narzędzi ściernych w ujęciu systemowym*. Praca zbiorowa pod red. A. Koziarskiego i A. Gołąbczaka „Obróbka ścierna, Tendencje rozwoju”, Łódź 2003, 3–78.
137. **Słowiński B.**, Prądyński M.: *System ekspertowy do wyboru ściernic*. Praca zbiorowa pod red. A. Koziarskiego i A. Gołąbczaka „Obróbka ścierna. Tendencje rozwoju”, Łódź 2003, 79–88.

138. **Słowiński B.**: *Wpływ budowy ściernic ceramicznych z mikrokrystalicznego korundu spiekanego typu SG na dynamiczny moduł Younga*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń (w druku).
139. **Słowiński B.**, Markul J.: *Effectiveness of grinding processes for grinding wheels made of modified abrasive type SG*. American Machinist (w druku).
140. **Słowiński B.**: *Oceń jakość*. VII Słupskie Forum Motoryzacji, Słupsk, 2004, 345–350.
141. **Słowiński B.**: *Systemowa ocena jakości narzędzi ściernych*. Mat. XXVII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Koszalin–Sarbinowo, 2004.
142. **Słowiński B.**, Fiks W.: *Dynamic strength of ceramic grinding wheels made of microcrystalline alumina type SG*. International Journal of Machine Tools & Manufacture (w druku).
143. Stabryła A.: *Analiza systemowa procesu zarządzania*. Wrocław, Wyd. Ossolineum, 1984.
144. Stanek S.: *Systemy bazujące na wiedzy w formułowaniu strategii organizacji*. Katowice, Wyd. Akademii Ekonomicznej w Katowicach, 1994.
145. Szkoda J.: *Zarządzanie jakością w procesach realizacji maszyn i urządzeń technicznych*. Olsztyn, Wyd. Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, 2002.
146. Tarnowski W.: *Modelowanie systemów*. Koszalin, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, 2004.
147. Tatarkiewicz W.: *Historia filozofii*. Warszawa, PWN, 1970.
148. Tyburski W., Wachowiak A., Wiśniewski R.: *Historia filozofii i etyki. Źródła i komentarze*, Toruń, Wyd. TNOiK, 1997.
149. Urbaniak M.: *System oceny użytkowych właściwości ściernic*. Rozprawy Naukowe Politechniki Łódzkiej, z 315, Zeszyty Naukowe nr 913, Łódź 2002.
150. Wawak S.: *Zarządzanie jakością. Teoria i praktyka*. Gliwice, Wyd. Helion, 2002.
151. Waldron R. A.: *Fale i drgania*. Poznań, PWN, 1967.
152. Wehr J.: *Pomiary prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych*. Warszawa, PWN, 1972.
153. Weiss Z., Hamrol A., Napierała J.: *Obróbka ścierna*. Poznań, Wyd. Politechniki Poznańskiej, 1985.
154. Wołgin L.N.: *Optymalizacja*. Warszawa, WNT, 1970.
155. Varian R.: *Mikroekonomia*, Warszawa, PWN, 1995.
156. Yoshikawa H.: *Theory of tool life for the grinding wheel*. Ann CIRP, nr 14/1967, 348–362.

157. Zamojski W.: *Modelowanie niezawodności systemów z wykorzystaniem sieci Petriego*. Mat. XXVII Zimowej Szkoły Niezawodności, Sekcji. Podstaw. Eksploatacji. KBN PAN, t. I, Szczyrk 1999, 140–155.
158. Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn*. Bydgoszcz, Wyd. ATR, 1996.
159. Żółtowski B., Ćwik Z.: *Leksykon diagnostyki technicznej*. Bydgoszcz, Wyd. ATR, 1996.