

Jan Jaworski • Tomasz Trzepieciński

Nadzorowanie procesu skrawania i stanu narzędzi z oszczędnościowej stali szybko tnącej

Wydano za zgodą Rektora

Opiniodawcy

dr hab. inż. Jan PORZYCKI, prof. PRz
doc. Ing. Ján SLOTA, PhD.

Redaktor naczelny

Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej
prof. dr hab. inż. Leonard ZIEMIAŃSKI

Redaktor

Marta JAGIEŁOWICZ

Przygotowanie matryc

Mariusz TENDERA

Projekt okładki

Joanna MIKUŁA

Jan Jaworski i Tomasz Trzepieciński są pracownikami naukowo-dydaktycznymi
Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

diagnostyka
obróbka skrawaniem
oszczędnościowa stal szybko tnąca
stan narzędzia
zużycie narzędzia

ISBN 978-83-7934-081-1

e-ISBN 978-83-7934-082-8

Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej
al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	5
Wprowadzenie	7
1. Systemy nadzorowania w zintegrowanych systemach wytwarzania ...	11
1.1. Zapewnienie niezawodności procesu skrawania	11
1.2. Metodyczne podstawy opracowania systemów diagnozowania	14
2. Zmiana stanu narzędzi podczas eksploatacji	21
2.1. Określenie kryterium stanu i kryterium utraty zdolności skrawnej narzędzia	21
2.2. Możliwości zastosowania oszczędnościowej stali szybko tnącej na narzędzia skrawające	25
2.3. Zmiany stanu wiertel ze stali szybko tnącej podczas obróbki żeliwa ..	27
2.4. Zmiany stanu wiertel podczas obróbki stali konstrukcyjnej	37
2.5. Zużycie i stan frezów walcowo-czołowych	45
3. Diagnostyczne cechy stanu narzędzia i procesu skrawania	49
3.1. Określenie zadań rozwiązywanych systemami diagnostycznymi	49
3.2. Siła skrawania – diagnostyczna cecha stanu procesu i narzędzia	49
3.2.1. Siłowe diagnostyczne cechy parametrów stanu	49
3.2.2. Czujniki odkształceń i przemieszczeń	54
3.2.3. Czujniki pomiarowe siły	55
3.2.4. Czujniki mocy wykorzystywane przez napędy obrabiarek	59
3.2.5. Czujniki momentu skręcającego	61
3.3. Drgania podczas procesu skrawania jako diagnostyczne cechy stanu procesu i narzędzia	62
3.3.1. Akustyczno-emisyjne metody diagnozowania zużycia narzędzia	62
3.3.2. Czujniki drgań – akcelerometry	67
3.4. Parametry obrabianej części jako diagnostyczna cecha stanu narzędzia	72
3.4.1. Diagnostyka stanu narzędzia	72
3.4.2. Czujniki do pomiaru parametrów konstrukcyjnych części obrabianej i narzędzia	75
4. Automatyczne stanowiska do diagnozowania stanu procesu i narzędzia	79
4.1. Techniczne zapewnienie funkcjonowania automatycznego stanowiska do diagnozowania stanu procesu i narzędzia	79

4.2. Budowa programów do funkcjonowania automatycznego stanowiska do diagnozowania stanu procesu i narzędzia	85
5. Systemy jednoparametrowej diagnostyki stanu procesu i narzędzia	91
5.1. Rozpoznawanie zużycia narzędzia	91
5.2. Rozpoznawanie zniszczenia narzędzia	96
5.3. Rozpoznawanie innych rodzajów utraty zdolności skrawnej narzędzia.....	100
6. Wieloparametryczna diagnostyka stanu narzędzia	103
6.1. Cechy diagnostyczne parametrów skrawania	103
6.2. Diagnozowanie stanu wiertel z oszczędnościowej stali szybkoobrotowej przy wierceniu żeliwa	104
6.3. Diagnozowanie stanu wiertel z oszczędnościowej stali szybkoobrotowej przy wierceniu stali	108
Podsumowanie	111
Literatura	115
Spis rysunków i tabel	125
Wykaz norm	131
Streszczenie	133
Abstract	134

Wykaz ważniejszych oznaczeń

a_p	– głębokość skrawania [mm]
A	– amplituda drgań [mm]
B	– szerokość frezowania [mm]
b_u	– długości odcinka styku wióra z powierzchnią natarcia [mm]
E	– moduł Younga [MPa]
f	– posuw [mm/obr]
F_B	– siła bezwładności [N]
f_R	– częstotliwość drgań [Hz]
F_z	– posuw na ząb [mm/ząb]
h_D	– grubość warstwy skrawanej [mm]
h_p	– zużycie na powierzchni przyłożenia [mm]
k_m	– moduł piezoelektryczny [C/N]
K_{max}	– współczynnik zapasu [–]
mVB	– funkcja oczekiwanego zużycia [–]
M_S	– moment skrawania [Nm]
n	– liczba obrobionych otworów [–]
N_s	– moc silnika [kW]
F_O	– siła osiowa [N]
F_x	– składowa osiowa siły skrawania [N]
F_y	– składowa odporowa siły skrawania [N]
F_z	– składowa styczna siły skrawania [N]
Q	– ładunek elektryczny [C]
Ra	– średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych profilu [μm]
R_m	– wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
r_ϵ	– promień zaokrąglenia wierzchołka ostrza [mm]
t	– czas obróbki [min]
T	– temperatura [$^\circ\text{C}$]
T_c	– trwałość ostrza [min]
T_{masz}	– czas maszynowy obróbki [min]
T_{sr}	– średni okres trwałości ostrza [min]
VB	– zużycie powierzchni przyłożenia ostrza [mm]
VB_{dop}	– dopuszczalna wartość zużycia powierzchni przyłożenia [mm]
VB_t	– zużycie łysinki wiertła [mm]

- VB_s – zużycie poprzecznej krawędzi skrawającej [mm]
 VB_w – zużycie wierzchołka wiertła [mm]
 VB_{wo} – zużycie wierzchołka wiertła od strony powierzchni przyłożenia [mm]
 v_c – prędkość skrawania [m/min]
 x – kwantyl rozkładu normalnego dla założonego prawdopodobieństwa [-]
 α – kąt przyłożenia ostrza [°]
 β – kąt ostrza [°]
 γ – kąt natarcia ostrza [°]
 ε – kąt wierzchołkowy [°]
 η_s – współczynnik sprawności silnika [-]
 η_o – współczynnik sprawności obrabiarki [-]
 κ_r – główny kąt przystawienia ostrza [°]
 ζ – informacyjność cechy diagnostycznej [-]
 σ – odchylenie standardowe trwałości ostrza [min]
 ω – częstotliwość kątowa drgań [rad/s]

Wprowadzenie

Podczas organizacji procesów skrawania w zautomatyzowanym systemie wytwarzania najbardziej złożone problemy pojawiają się w ocenie wydajności i niezawodności obróbki. Wysokie wymagania odnośnie do jakości obrabianych części determinują technologiczne uszkodzenia jako główny obiekt badań w teorii niezawodności systemu technologicznego [47, 60]. W czasie eksploatacji system technologiczny podlega mechanicznym, cieplnym i innym oddziaływaniom, które powodują uszkodzenia i zmieniają wartości parametrów jego stanu wyjściowego. Funkcjonowanie wszystkich elementów systemu technologicznego zapewnia realizację procesu technologicznego, a wskaźniki jakościowe obrabianych części określają zarówno oprzyrządowanie technologiczne, obrabiarka i narzędzie, jak i parametry obróbki [54, 151].

Diagnostyka zajmuje się ustalaniem i badaniem oznak charakteryzujących obecność defektów powstających w narzędziu podczas skrawania w celu przewidzenia możliwych obciążeń w stanie narzędzia w trakcie rozpracowywania metod i środków odkrycia tych defektów [5, 156]. Procedura określania stanu narzędzia nazywa się diagnozowaniem. Ponieważ funkcjonalne parametry procesu skrawania są często stosowane jako pośrednie cechy (oznaki) diagnostyczne, podczas diagnozowania narzędzia jednocześnie jest diagnozowany proces skrawania. Podstawowym celem organizacji ciągłej kontroli i diagnostyki narzędzia w procesie jest zwiększenie niezawodności i wydajności automatycznego oprzyrządowania obrabiarek posiadającego zautomatyzowany system narzędziowy. Kontrola i diagnostyka w tym systemie powinny zapewnić w automatycznym porządku rozwiązanie zadań [8, 37, 71]:

- automatycznego określania stanu narzędzia i wszystkich rodzajów jego wyjścia z eksploatacji,
- określania możliwych kolizji narzędzia z obrabianą częścią i elementami obrabiarki.

Warunkiem niezawodnej pracy obrabiarek NC w zautomatyzowanych systemach wytwarzania jest nadzór stanu narzędzi skrawających. Układy diagnostyczne mają za zadanie wykrywanie m.in. skrawania, zużycia ostrza, katastroficznego zużycia ostrza, braku narzędzia. Układ nadzorujący proces określa na podstawie sygnałów diagnostycznych uzyskanych z czujników sił skrawania i emisji akustycznej lub drgań zainstalowanych na obrabiarence aktualny stan narzędzia skrawającego i umożliwia zatrzymanie posuwu po wykryciu katastroficznego stopienia ostrza.

Monitorowanie i nadzór nad stanem ostrza może wykonywać człowiek – operator. Zadania te mogą być realizowane również automatycznie. W przypadku nadzorowania naturalnego zużycia ostrza przez człowieka operator monitoruje zwykle jego stan na podstawie [82, 87, 134]:

- obserwacji właściwości technologicznych, np. na podstawie oceny jakości powierzchni przedmiotu uzyskanej po obróbce,
- obserwacji zjawisk towarzyszących skrawaniu i działających na jego zmysły – zwykle ocenia zużycie na podstawie emitowanych dźwięków lub drgań,
- obserwacji zmian geometrii ostrza w czasie przerw w obróbce.

Diagnostyka procesu i narzędzia jako składowa informacyjnego zabezpieczenia zautomatyzowanego przedsiębiorstwa jest zagadnieniem mało poznanym. Zwiększenie niezawodności diagnostyki stanu narzędzia oraz wprowadzenie elementów sterowania procesem obróbki wymaga badań w celu określenia specyfiki zużycia konkretnych narzędzi i związku parametrów procesu skrawania z utratą zdolności skrawnej narzędzia [10].

Przy optymalnych warunkach eksploatacji narzędzia mającego wymagane parametry wyjściowe dominującym czynnikiem decydującym o utracie zdolności skrawnej są uszkodzenia spowodowane zużyciem powierzchni skrawających. Dla zapewnienia niezawodności diagnozowania konieczne jest przede wszystkim zbadanie stanu narzędzia w konkretnych warunkach jego eksploatacji i określenie, który zmieniający się parametr może stanowić kryterium oceny narzędzia [10, 36].

Z teoretycznych i eksperymentalnych badań wynika, że technolog ma do dyspozycji wiele środków i metod sterowania obróbką skrawaniem w celu zwiększenia jej wydajności i niezawodności. W szczególności możliwy jest taki dobór parametrów skrawania, przy których w warunkach normalnego zużycia narzędzia jest zapewnione wymagane prawdopodobieństwo spełnienia wszystkich wymagań jakościowych odnośnie do obrabianej części, a niezawodność procesu skrawania jest uwarunkowana żądanym okresem trwałości narzędzia, siłą skrawania, jakością i dokładnością obrabianych części [31].

Ponieważ wiele firm nie tylko konstruuje obrabiarki, lecz także opracowuje systemy ich sterowania i diagnozowania, oczywiste jest, że potrzebni są specjaliści posiadający wiedzę i umiejętności prowadzenia badań niezbędnych do zaprojektowania systemów diagnostycznych. Taka wiedza jest również przydatna podczas eksploatacji i doskonalenia istniejących systemów diagnostyki na obrabiarkach w zautomatyzowanym przedsiębiorstwie.

Prezentowana monografia przybliży tę wiedzę. Szczególną uwagę poświęcono zadaniom koniecznym do przeprowadzenia prac badawczych, od których powinno się rozpocząć badanie systemów diagnozowania procesu i narzędzia. Do ich przeprowadzenia wykorzystano stanowiska badawcze. Dużo uwagi poświęcono także opisowi stanowisk i składających się na nie elementów, szczególnie omówiono czujniki pomiaru parametrów procesu charakteryzujących stan

narzędzia. Podstawę rozważań stanowiły przeprowadzone badania dotyczące zapewnienia jakości narzędzi z oszczędnościowej stali szybko tnącej oraz dane z literatury na temat kontroli i diagnostyki narzędzi. Przedstawione informacje powinny umożliwić zdobycie podstaw tej wiedzy. Wskazówki metodyczne oparto na doświadczeniu oraz wynikach badań własnych. Autorzy mają nadzieję, że zaprezentowane w opracowaniu informacje będą użyteczne dla studentów, doktorantów oraz słuchaczy studiów podyplomowych na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej oraz absolwentów podejmujących pracę w działach konstrukcyjnych i technologicznych.

1. Systemy nadzorowania w zintegrowanych systemach wytwarzania

1.1. Zapewnienie niezawodności procesu skrawania

Narzędzie skrawające o określonych parametrach stanu wyjściowego rozpoczyna pracę przy zadanych warunkach, dla których zostało zaprojektowane. W procesie skrawania parametry geometryczne ostrza wraz z upływem czasu zmieniają swoją wartość pod wpływem termodynamicznych obciążeń. Dla zapewnienia niezbędnej wydajności obróbki skrawaniem oraz obliczeń kosztów zużycia narzędzia jeszcze na etapie projektowania powinno się prognozować wskaźniki niezawodności narzędzia. Żywotność narzędzia jest charakteryzowana całym okresem jego eksploatacji, uwzględniającym konieczność jego ostrzenia w celu zapewnienia stanu gotowości do wykonywanej pracy [19, 24, 35, 39, 45]. Wszystkie ilościowe wskaźniki trwałości narzędzia (m.in. prawdopodobieństwo niezawodnego działania narzędzia, trwałość, średnia trwałość, funkcja gęstości trwałości) mogą być wyznaczone tylko w wyniku przeprowadzonych eksperymentów z użyciem narzędzia posiadającego określone wskaźniki stanu wyjściowego oraz w wyniku statystycznych obserwacji narzędzia w procesie jego eksploatacji.

Procesy tribologiczne występujące w miejscach styku ostrza skrawającego z przedmiotem obrabianym prowadzą do zużycia, a następnie do nagłej lub stopniowej utraty skrawności ostrza [81, 118, 139]. Do objawów zużycia ostrza należy zaliczyć [37, 54, 75, 109, 151]: zmianę geometrii ostrza, zmiany właściwości fizykochemicznych wskutek przemian chemicznych w warstwie wierzchniej materiału spowodowanych głównie oddziaływaniem wysokiej temperatury oraz pęknięcia i ubytki materiału narzędzia skrawającego.

Zautomatyzowane technologiczne systemy w przemyśle budowy maszyn oparte na zastosowaniu obrabiarek sterowanych numerycznie często są mało efektywne, co jest związane z niedostateczną niezawodnością narzędzi. W większości przypadków urata żywotności narzędzia następuje z powodu jego zniszczenia [3, 51]. Prowadzi to do zwiększenia liczby braków kosztów narzędzi oraz do strat czasu na znalezienie przyczyn przyśpieszonego zużycia. Aby zmniejszyć te straty, organizuje się wyprzedzającą wymianę narzędzia po upływie czasu jego niezawodnej pracy. Czas niezawodnej pracy narzędzia z założonym prawdopodobieństwem $T(p)$ wyznacza się na etapie projektowania procesu technologicznego według znanych zależności teorii niezawodności [10, 97, 102]. Do obliczenia czasu niezawodnej pracy narzędzia konieczna jest znajomość funkcji

rozkładów prawdopodobieństwa trwałości narzędzia. Jeżeli trwałość podlega rozkładowi Gaussa, to przy założonym prawdopodobieństwie można ją wyznaczyć z zależności:

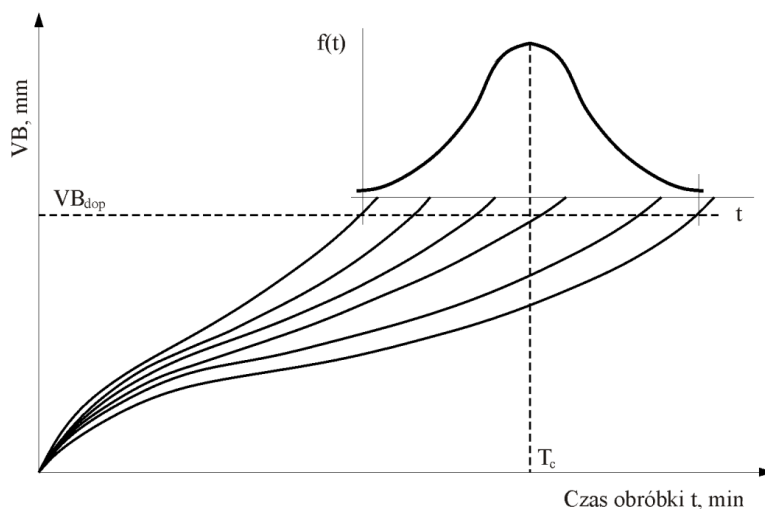
$$T(P) = T_{sr} - x\sigma \text{ [min]} \quad (1.1)$$

gdzie: T_{sr} – średnia trwałość narzędzia [min],

x – kwantyl rozkładu normalnego dla założonego prawdopodobieństwa (wartość jest podawana w tablicach statystycznych),

σ – średnie kwadratowe odchylenie trwałości narzędzia od jego wartości średniej [min].

Wartości parametrów T_{sr} i σ można wyznaczyć na podstawie statystycznych badań trwałości jako funkcji losowej przy stałych parametrach eksploatacji narzędzia. Jeśli przyjąć zalecane w literaturze dla zautomatyzowanego przedsiębiorstwa prawdopodobieństwo niezawodnej pracy równe 0,9, to czas niezawodnej pracy równy czasowi wyprzedzającemu zużycia narzędzia będzie znacznie krótszy od jego średniej wartości, a tym bardziej od jego maksymalnej trwałości. Funkcja zużycia ostrza na powierzchni przyłożenia $VB = f(t)$ jest niezbędna do obliczenia niezawodności narzędzia. Osiągnięcie przez nią (według przyjętego kryterium) założonego zużycia VB określa moment wycofania narzędzia z eksploatacji i odpowiadający mu okres trwałości ostrza T_c (rys. 1.1). Dla wszystkich przyjętych realizacji funkcji zużycia $VB = f(t)$ czas osiągnięcia przez narzędzie



Rys. 1.1. Przebieg przypadkowych funkcji zużycia powierzchni przyłożenia ostrza $VB = f(t)$ i rozkład normalny trwałości przy dopuszczalnej wartości zużycia [54]

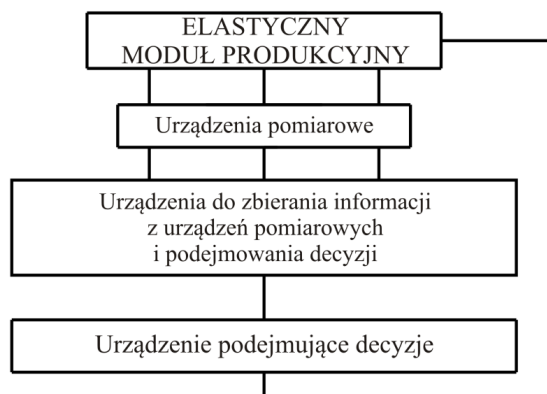
wartości dopuszczalnego zużycia VB_{dop} , czyli praca do momentu utraty zdolności skrawnej narzędzia jest większa niż czas T_c . Można zatem wnioskować, że 90% wszystkich narzędzi będzie wymienione przed osiągnięciem dopuszczalnego rezerwu eksploatacji, co doprowadzi do strat eksploatacyjnych.

W małoseryjnej i seryjnej produkcji na obrabiarkach NC i elastycznych systemach produkcyjnych (ESP) w wielu przypadkach nie jest możliwe określenie czasu T_c , nawet dla wyprzedzającej wymiany narzędzia, ponieważ narzędzie jest eksploatowane z różnymi parametrami skrawania w przeciętnym okresie trwałości. Dla tych nieokreślonych warunków nie można wyznaczyć funkcji rozkładu trwałości ostrza T_c . Utrata zdolności skrawnej narzędzia w tym przypadku nie jest prognozowana [54].

Nieprognozowana utrata zdolności skrawnej narzędzia zdarza się również na skutek kruchego zniszczenia jego części skrawającej. Wymiana narzędzia przeprowadzona w odpowiednim czasie zapewnia pełne wykorzystanie jego możliwości skrawających. Wymiana w przypadku nieprognozowanego wyjścia z eksploatacji jest możliwa tylko po zareagowaniu we właściwym czasie, co można osiągnąć przy stałej kontroli stanu narzędzia i procesu skrawania. Do takiego wniosku doszły wiodące firmy produkujące obrabiarki, które intensywnie prowadzą prace mające na celu rozwiązanie tego problemu. Kontrola stanu narzędzia może być działaniem okresowym po zakończeniu realizacji przejścia lub operacji bądź działaniem ciągłym podczas całego procesu skrawania. Kontrola okresowa nie rozwiązuje w pełni zadania wymaganej zamiany narzędzia, ponieważ procesy prowadzące do utraty zdolności skrawnej narzędzia często rozwijają się krócej niż czas maszynowy obróbki T_{masz} , pożądana jest zatem ciągła kontrola procesu zużycia ostrza narzędzia. Ciągłej kontroli stanu narzędzia nie można osiągnąć prostymi metodami, gdyż część skrawająca narzędzia jest niedostępna dla bezpośredniego pomiaru. Można tego dokonać tylko metodami pośrednimi.

Metody pośrednie kontroli to pomiary, przy których wyznacza się poszukiwane wartości zużycia na podstawie znanej zależności między tą wielkością a wielkością podlegającą bezpośredniemu pomiarowi. W niniejszej monografii rozważania oparto na okresowej kontroli narzędzia za pomocą pomiaru bezpośredniego. Pośrednie pomiary określenia stanu narzędzia są możliwe do realizacji na podstawie wykrycia oznak charakteryzujących stan narzędzia z wykorzystaniem teorii rozpoznawania w dziedzinie diagnostyki technicznej. Realizacja funkcji kontroli i diagnostyki wymaga środków, których strukturę w ogólnym przypadku przedstawiono na rys. 1.2.

W zależności od rozwiązywanego zadania i wymaganych środków potrzebne są różne przyrządy pomiarowe składające się z czujników przekształcających diagnostyczne cechy stanu narzędzia, układów do obróbki sygnałów, urządzeń do zbierania i obróbki informacji. Urządzeniem takim może być np. przyrząd-



Rys. 1.2. Struktura środków kontroli i diagnozowania

dowanie systemu narzędziowego albo kontroler wchodzący w skład współczesnych elastycznych systemów produkcyjnych. Niezawodność eksploatacji narzędzia w fabryce bezzałogowej zapewnia zatem system kontroli diagnostyki i podejmowania decyzji. Zgodnie z przedstawionym na rys. 1.2 systemem strukturalnym dąży się do opracowania systemów diagnostycznych dla różnych typów narzędzi. W przedsiębiorstwach coraz częściej stosuje się obrabiarki z wbudowanymi systemami elektronicznymi i urządzeniami ciągle śledzącymi za pomocą określonych sygnałów stan procesu skrawania i narzędzia.

1.2. Metodyczne podstawy opracowania systemów diagnozowania

Podczas skrawania wzajemne jednoczesne oddziaływanie narzędzia i materiału obrabianego wywołuje dwa przeciwstawne procesy: zmianę stanu materiału obrabianego i zmianę stanu narzędzia. Stan powierzchni materiału obrabianego po obróbce skrawaniem charakteryzują przedstawione na rys. 1.3 parametry stanu warstwy wierzchniej. Ich wartość określają parametry skrawania.

Zmiana stanu narzędzia jest skutkiem zużycia jego powierzchni skrawających albo wykruszeń. Geometria ostrza – jeden z parametrów procesu skrawania oraz podstawowe parametry tworzącego się wióra i warstwy wierzchniej obrabianej części podlegają ciągłej ewolucji. Z kolei parametry tworzącego się wióra i stan warstwy wierzchniej wpływają na specyfikę zużycia narzędzia i jego parametry (rys. 1.3). Mimo wzajemnych powiązań między parametrami tworzącego się wióra, stanem warstwy wierzchniej i stanem ostrza narzędzia proces skrawania charakteryzuje się również tak zwanymi funkcjonalnymi parametrami procesu.

Spośród parametrów funkcjonalnych procesu skrawania szczególne znaczenie ma siła skrawania, która powstaje przy zadanym kinematyką skrawania względnym ruchu narzędzia w stosunku do obrabianej części. Wartość siły

skrawania wynika z oporów pokonywanych podczas zdejmowania warstwy skrawanej i oporów tarcia występujących przy tym ruchu.



Rys. 1.3. Wzajemny związek między parametrami stanu narzędzia i parametrami procesu skrawania: A – amplituda drgań, EA – emisja akustyczna, ω – częstotliwość kątowna drgań, R – siła skrawania, SED – siła elektrodynamiczna, Q_N – źródło ciepła, T – temperatura, opracowano na podstawie [121]

Każda zmiana warunków skrawania prowadzi do korekty wartości parametrów siłowych. W związku z niestabilnością procesu skrawania mogą się zmieniać nie tylko średnie wartości siły skrawania R i kierunek jej działania, lecz

także amplituda A i częstotliwość drgań ω . Wartość siły skrawania jest taka sama zarówno dla stanu materiału obrabianego, jak i dla narzędzia. Wartość ta określa niezbędną pracę i moc skrawania. Źródło ciepła Q_N powstające wskutek konwersji energii mechanicznej w ciepłą tworzy różne, określone rozkładem temperatury warunki cieplne procesów. Podobnie jak siła skrawania, źródło ciepła i związany z tym rozkład temperatury są wrażliwe na wahania wartości parametrów skrawania, parametrów stanu narzędzia i wióra oraz stanu warstwy wierzchniej. Wzajemny związek trzech bloków parametrów procesu skrawania (rys. 1.3) stosuje się do rozwiązywania konkretnych zadań diagnostyki. Podczas diagnostyki stanu narzędzia, gdy jako kryterium jakości może być przyjęty jakikolwiek wymiar jego zużycia, diagnostycznymi cechami przyczyn o większej lub mniejszej informacyjności mogą więc być zarówno parametry stanu obrabianej części oraz wióra, jak i funkcjonalne parametry procesu skrawania. Maksymalne wartości tych parametrów mogą być wykorzystane jako kryterium utraty zdolności skrawnej narzędzia. Możliwe diagnostycznie cechy stanu narzędzia, wióra i obrabianej części przedstawiono w tab. 1.1. W diagnostyce wykorzystuje się najbardziej informacyjne cechy diagnostyczne, które są wyznaczane eksperymentalnie.

Tabela 1.1. Możliwe diagnostyczne cechy stanu narzędzia, wióra i obrabianej części

Cechy diagnostyczne Obiekt monitorowany	Parametry stanu narzędzia	Parametry stanu wióra	Parametry stanu części obrabianej	Funkcjonalne parametry procesu
Parametry stanu narzędzia	+			+
Parametry stanu wióra	+			+
Parametry stanu części obrabianej		+	+	+
Funkcjonalne parametry procesu	+			

W diagnostyce procesu skrawania i narzędzia jako cechy diagnostyczne często są stosowane sygnały różnych zjawisk fizycznych towarzyszące procesowi skrawania. Przykładowo, sygnały dźwiękowe o dużej częstotliwości (emisja akustyczna EA) powstające przy zmianie stanu obrabianego przedmiotu niosą określoną informację o przebiegu tych procesów. Do odzwierciedlenia procesów o mniejszym styku na roboczych powierzchniach narzędzia mogą służyć sygnały zjawisk elektrycznych występujących w strefie kontaktu. Jako podstawę diagnozowania procesu skrawania i stanu narzędzia można przyjąć założenie o odwrotności zależności między parametrami stanu $K_1, K_2 \dots K_n$ a innymi parametrami

procesu będącymi ich pośrednimi diagnostycznymi cechami $P_1, P_2 \dots P_n$. Przy założonych warunkach wiarygodność diagnozowania określa się informacyjnością ξ cech diagnostycznych P_n . Pod pojęciem informacyjności rozumiemy stosunek zmiany wartości cechy diagnostycznej ΔP_i do zmiany parametru stanu ΔK_i . Ponadto w związku z niestabilnością procesu skrawania wartość P_n może się wahać wokół wartości średniej z określoną amplitudą i częstotliwością. Do wyliczenia wartości informacyjności przyjmuje się średnie wartości P_n otrzymane w rezultacie kilku pomiarów wielkości P_i w krótkim czasie. Najbardziej informacyjne parametry z szeregu diagnostycznych cech określa się na podstawie badań i obliczeń informacyjności, która jest równa:

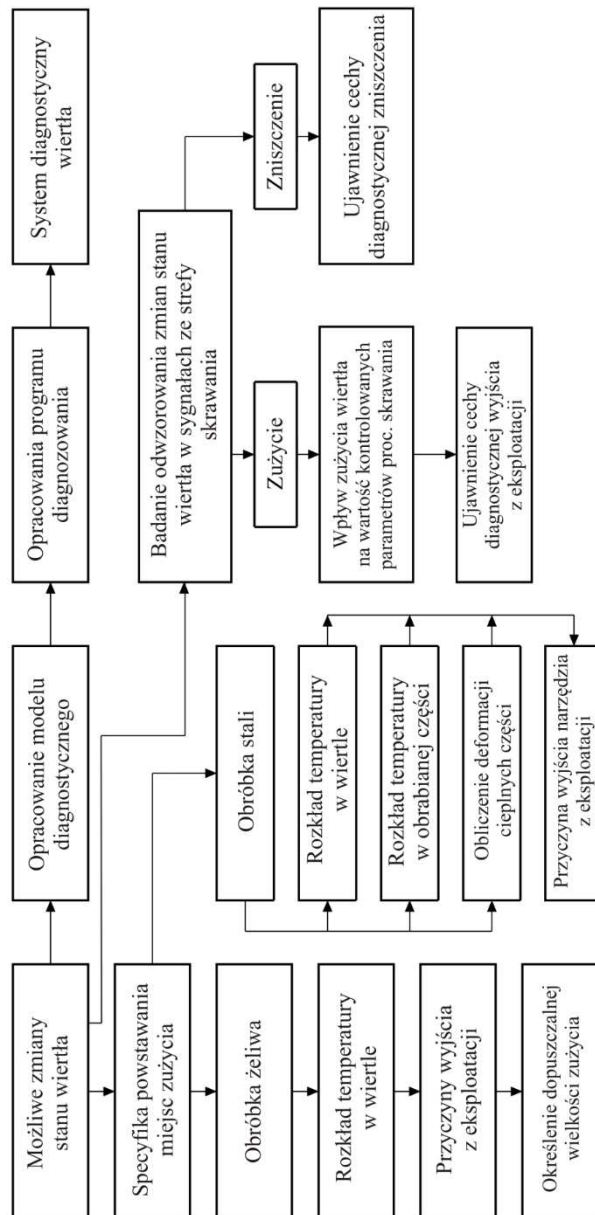
$$\xi = \frac{\Delta P_i}{\Delta K_i} \quad (1.2)$$

Jeżeli jeden przyjęty parametr procesu o charakterystycznej cesze jakościowej przedstawia stan procesu lub narzędzia, to diagnostykę zbudowaną na tej podstawie nazywa się jednoparametryczną. Zależność $P_i = f(K_i)$ otrzymana dla określonych warunków pozwala wyznaczyć aktualne kryterium stanu i dopuszczalne jego wartości przy konkretnych warunkach skrawania. Do wyznaczenia wartości tych parametrów różnych warunków, np. różnych parametrów skrawania, powinno się jednak stosować bardziej złożone zależności $P_i = f(K, v_c, a_p, f)$, ponieważ przyjęta cecha diagnostyczna zależy nie tylko od parametru stanu K_i , lecz także od parametrów skrawania (v_c, a_p, f), które są znane.

W wielu przypadkach dla zwiększenia pewności diagnozy konieczne jest przeprowadzenie diagnostyki wieloparametrycznej, co jest determinowane wieloma przyczynami. Przykładowo, w przypadku niedostatecznej informacyjności cech diagnostycznych cechy te powtarza się. Wykorzystując cechę diagnostyczną, wyklucza się wpływ dominującego losowego czynnika procesu skrawania znacząco zamazującego wyniki diagnozowania procesu skrawania lub narzędzia. Przykłady diagnostyki wieloparametrycznej przedstawiono w rozdziale 6.

System diagnostyki narzędzia powinien się opierać na naukowo-metodycznym podejściu obejmującym pięć etapów prac:

1. Na podstawie badań teoretycznych i eksploatacyjnych należy ustalić możliwe w procesie eksploatacji zmiany stanu narzędzi, określić kryterium stanu narzędzia i kryterium utraty zdolności skrawnej narzędzia. Jako kryterium stanu narzędzia powinien być przyjęty parametr narzędzia możliwy do nadzorowania, jednoznacznie charakteryzujący przy danych warunkach eksploatacji aktualny stan narzędzia za pomocą przyjętych cech diagnostycznych. Może to być wielkość opisująca miejsce zużycia, wykruszenie, narost itp. Dopuszczalną wartość tego parametru określa kryterium utraty zdolności skrawnej narzędzia.



Rys. 1.4. Naukowo-metodyczne podstawy prac diagnozowania procesu wiercenia, opracowano na podstawie [121]

2. Na podstawie badań eksperymentalnych z dostępnej liczby parametrów skrawania należy określić pośrednie cechy diagnostyczne możliwych zmian w stanie narzędzia i ich kryterium stanu. W wyniku tej analizy otrzymujemy najbardziej informacyjną cechę diagnostyczną.
3. Należy opisać związki między kryterium stanu narzędzia a cechami diagnostycznymi na podstawie badań odzwierciedlających zmianę kryterium stanu

przez diagnostyczne sygnały ze strefy skrawania oraz opracować modele diagnostyczne, które mogą mieć charakter albo zdeterminowany albo stochastyczny.

4. Należy opracować algorytmy i oprogramowanie zapewniające diagnozowanie systemu.
5. Należy opracować aparaturową realizację algorytmu diagnozowania.

Naukowo-metodyczne podstawy pracy z zakresu budowy systemów diagnostyki przedstawiono na rys. 1.4. Podczas rozwiązywania zadań diagnozowania procesu skrawania i narzędzia jest rekomendowane podejście systemowe. Badany obiekt jest rozpatrywany jako system powiązanych ze sobą obszarów wiedzy osiągniętych w założonej określonej kolejności. Z przedstawionych prac wynika, że większa ich część zawiera badania w obszarze teorii skrawania, która nabiera szczególnego znaczenia podczas rozpracowywania systemów diagnostyki. Oczywiście badania te są oparte na wcześniej zgromadzonej wiedzy. Często jednak w przypadku konkretnych procesów i narzędzi pojawiają się nowe zadania, których rozwiązanie jest konieczne dla zwiększenia niezawodności diagnozowania.

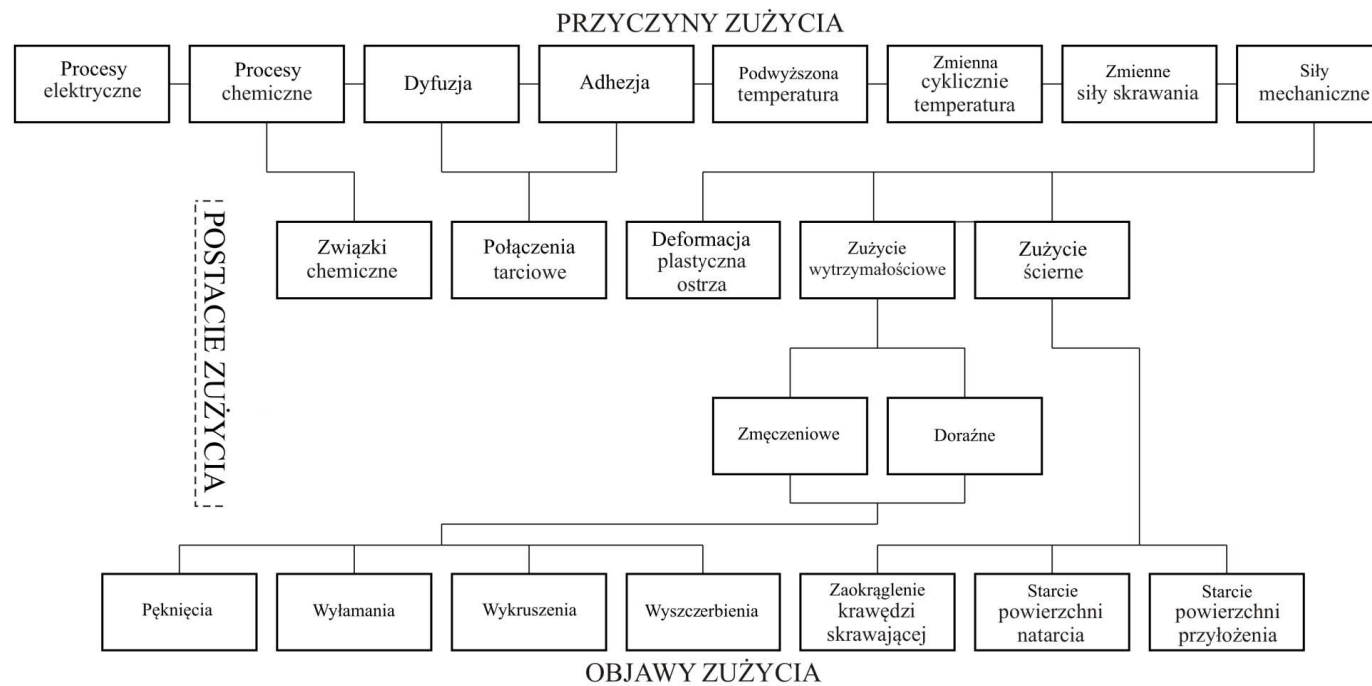
2. Zmiana stanu narzędzi podczas eksploatacji

2.1. Określenie kryterium stanu i kryterium utraty zdolności skrawnej narzędzia

System diagnostyczny należy rozpatrywać w całości jako zespół urządzeń technicznych, narzędzi i środków diagnostycznych. Charakter możliwych zmian stanu narzędzia określa strukturę systemu i algorytm diagnozowania. Na zautomatyzowanych obrabiarkach stosuje się różnego rodzaju narzędzia. Najszersze zastosowanie mają narzędzia z węglików spiekanych z mechanicznym mocowaniem wielostrzowych płytek w specjalnych oprawkach. W pracy [54] omówiono rodzaje i przyczyny utraty ich zdolności skrawnej. Na rysunku 2.1 rozpatrzone najbardziej ogólne zależności powstawania zużycia, zmian struktury i właściwości części skrawającej narzędzia w zależności od przeznaczenia i parametrów skrawania.

Specyfika procesów obróbki skrawaniem sprawia, że podczas eksploatacji narzędzia bardzo trudno jest określić optymalny z ekonomicznego punktu widzenia moment wymiany narzędzia. W poradnikach są wprowadzone podane dopuszczalne wartości zużycia, przy których należy dokonać wymiany narzędzia, mogą się one jednak zasadniczo różnić od tych, przy których następuje pełne wykorzystanie jego możliwości skrawnych [54, 151]. W związku z tym celem zapewnienia niezawodności diagnozowania konieczne jest przede wszystkim zbadanie stanu narzędzia w konkretnych warunkach jego eksploatacji i określenie, który zmieniający się wskaźnik może służyć za kryterium oceny narzędzia [38, 80, 122]. Na rynku są dostępne systemy monitorowania stanu ostrza narzędzi skrawających metodami pośrednimi i bezpośrednimi, wykazującymi różną skuteczność [57, 58]. System monitorowania założonego stanu zużycia narzędzia uwzględniający możliwość dalszego jego rozwoju w celu stworzenia zintegrowanego systemu sterowania adaptacyjnego procesem zapewniającym maksymalizację wydajności skrawania zaproponowano w pracy [3].

Stan wejściowy narzędzia charakteryzuje wiele parametrów [54, 90, 95]. W procesie skrawania zmiana wartości każdego z tych parametrów w ostatecznym rezultacie odzwierciedla wzrost intensywności zużycia lub wykruszenie krawędzi skrawających. Jako kryterium stanu przyjmuje się więc dowolny wymiar zużycia lub wielkość narostu zależną od zużycia powierzchni natarcia. Dopuszczalne wartości tych wymiarów, przy których rozpoczyna się katastroficzne zużycie części skrawającej narzędzia, ustala się indywidualnie, naruszając



Rys. 2.1. Przyczyny, postacie i objawy zużycia ostrzy, opracowano na podstawie [31]

często ustalone w dokumentacji technologicznej wymagania decydujące o kryterium utraty zdolności skrawnej narzędzia.

Narost tworzy nawarstwiający się na powierzchni natarcia ostrza narzędzia (lub jednocześnie na powierzchni natarcia i przyłożenia) materiał odkształcalny plastycznie [7, 46, 110, 138]. Zjawisko to jest charakterystyczne dla materiałów sprężysto-plastycznych [68]. Silnie zgniezione warstwy materiału na powierzchni narzędzia układają się prawie równolegle do powierzchni natarcia ostrza. Twardość narostu jest od 2,5 do 3 razy większa od twardości obrabianego materiału i jest zmienna w jego przekroju [7, 69]. Najwyższą wartość twardości obserwuje się w bezpośrednim obszarze krawędzi skrawających, nieco niższą w środkowej części narostu, najniższą zaś w pobliżu wierzchołka [68].

Intensyfikacja procesu tworzenia narostu następuje w określonym zakresie prędkości skrawania, posuwów oraz odpowiadającej im temperatury i siłom skrawania [7]. Według Bobrova [7] najintensywniejszy rozwój narostu odpowiada takiej prędkości skrawania, przy której temperatura w strefie kontaktu wiór – powierzchnia natarcia wynosi około 300°C. Z kolei w warunkach skrawania, przy których wartość temperatury kontaktowej wynosi około 600°C, obserwuje się zanik tworzenia narostu.

Z teoretycznych i eksperymentalnych badań wynika, że technolog ma do dyspozycji wiele środków i metod sterowania obróbką skrawaniem w celu zwiększenia jej wydajności i niezawodności [122]. W szczególności możliwy jest taki dobór parametrów skrawania, dla których w warunkach normalnego zużycia narzędzia jest zapewnione wymagane prawdopodobieństwo spełnienia wszystkich wymagań jakościowych obrabianej części, a niezawodność procesu skrawania jest uwarunkowana założonym okresem trwałości narzędzia, jakością i dokładnością obrabianych części [72, 116, 154]. Dla optymalnych warunków eksploatacji narzędzia o wymaganych parametrach wyjściowych dominującym czynnikiem są uszkodzenia spowodowane zużyciem powierzchni skrawających narzędzia [78, 79]. W tym przypadku jako kryterium stanu narzędzia powinien być wybrany taki zmieniający się parametr, który będzie [22, 47, 51, 122, 126, 156]:

- jednoznacznie w każdej sytuacji przedstawiał zmiany geometrii i właściwości materiału narzędzia wynikłe ze zużywania się ostrza,
- monotonicznie wzrastał w strefie normalnego zużycia,
- umożliwiał realizację dokładnych pomiarów,
- informacyjnie opisany przez parametry procesu skrawania przyjęte jako cechy diagnostyczne.

W dalszej części rozdziału dokonano analizy mającej na celu znalezienie zarówno kryterium oceny stanu, jak i kryterium wyjścia z eksploatacji wiertel oraz frezów.

W procesie wiercenia, gdy wartość deformacji wierconego otworu przekroczy wartość luzu powstającego w rezultacie odwrotnej stożkowatości wiertła, powierzchnia obrabianego otworu może wywoływać na łysinki naciski więk-

szające wraz ze wzrostem ich zużycia. Wraz ze wzrostem zużycia wzrasta również cieplna deformacja obrabianego otworu, przy czym wykonywane otwory ulegają deformacji w taki sposób, że ich średnica się zmniejsza [54]. Zmiany stereometrii ostrza związane z jego zużyciem wpływają na przebieg procesu wiercenia otworu [66], szczególnie w przypadku wykonywania otworów głębokich [20]. Wpływ zużycia wiertła na dokładność wiercenia głębokich otworów była badana przez Wieczorowskiego i Matuszaka [145] oraz Wieczorowskiego i Siecla [146]. W pracach podano wyniki badań zużycia ostrzy płytek, miejsca występowania zużycia ostrzy, udział poszczególnych rodzajów zużycia ostrzy oraz przykład prawidłowych kształtów wiórów powstających w procesie wiercenia.

Wyniki badań nadzorowanego zużycia wiertel o średnicy 1,5 mm podczas wiercenia otworów o głębokości 15 mm przeprowadzonych przez Heinemanna i innych [42] doprowadziły do następujących konkluzji:

- osiowa siła skrawania jest w niewielkim stopniu skorelowana ze stopniem zużycia wiertła,
- poziom wartości momentu skręcającego wykazuje tendencję wzrostową pod koniec okresu trwałości wiertła,
- wartość momentu skręcającego może być wykorzystana do nadzorowania procesu wiercenia głębokich otworów.

Układ nadzorowania procesu wiercenia otworów o średnicy 0,25 mm zapobiegający na podstawie pomiarów wartości siły osiowej uszkodzeniom wiertła przez odpowiednio wczesne wycofanie narzędzia z otworu został opracowany przez Kima i innych [73].

Katastroficzne zużycie narzędzia ze stali szybko tnącej jest związane ze wzrostem temperatury w jego części skrawającej do wartości powodujących zmianę podstawowych właściwości narzędzia [37, 151]. Wyniki badań Meena i El Mansori [96] wykazały, że obróbka żeliwa z dużą wartością szybkości skrawania w połączeniu z niskimi wartościami posuwu zwiększa wartość sił skrawania oraz energii właściwej cięcia. W przypadku wiertła przy ustalonej specyfice zużycia temperatura może wzrastać tylko wskutek wzrostu mocy źródła ciepła na głównych powierzchniach przyłożenia. Od tych źródeł ciepła na etapie ustalonego zużycia nagrzewa się część skrawająca wiertła oraz łysinki [29]. W warunkach produkcyjnych i laboratoryjnych za początek katastroficznego zużycia wiertła przyjmuje się charakterystyczny dźwięk skrzypienia [156], powodowany zmianami tribologicznymi w miejscu styku powierzchni skrawających wiertła z materiałem obrabianym. Początek tego procesu jest sygnalizowany zwiększeniem amplitudy sygnału akustycznego i wzrostem momentu tarcia powstającego na łysinkach wiertła [38]. Stopień zużycia ostrza jest oceniany za pomocą wielu kryteriów, które można podzielić na cztery grupy [144]: technologiczne, fizyczne, ekonomiczne oraz geometryczne.

Według Pancielejki [106] podczas określania zużycia zarówno wiertel niepokrytych, jak i tych z twardymi powłokami wskazane jest stosowanie kilku

wskaźników zużycia. Badania eksploatacyjnych wiertel krętych wykonanych ze stali szybko tnącej HS6-5-2 bez powłoki oraz z powłokami węglikoazotku tytanu Ti(C, N) wykazały, że zastosowane wskaźniki charakteryzujące zużycie wiertel na narożach, łysince prowadzącej i krawędzi poprzecznej dobrze opisują przebieg zużycia badanych wiertel. Badania Liu i innych [87] wykazały, że za kryterium zużycia ostrza należy uznać zużycie w narożu wiertła.

2.2. Możliwości zastosowania oszczędnościowej stali szybko tnącej na narzędzia skrawające

Stal szybko tnąca jest wieloskładnikowym stopem na osnowie żelaza, który oprócz węgla, domieszek krzemu i manganu oraz zwykłych zanieczyszczeń zawiera znaczne ilości pierwiastków stopowych węglilotwórczych (chrom zwykle w ilości około 4%, wolfram do 20%, molibden do 9%, wanad do 5%, a niekiedy dodatkowo nietworzący węglików kobalt). Zawartość pierwiastków stopowych w stali szybko tnącej wytwarzanych metodami metalurgii konwencjonalnej dochodzi do 30%. Zawartości pierwiastków stopowych w tej stali można zwiększyć przez zastosowanie technologii metalurgii proszków [43]. Podstawowymi pierwiastkami stopowymi w stali szybko tnącej są takie deficytowe dodatki stopowe, jak wolfram lub wolfram z molibdenem. W stali szybko tnącej optymalna zawartość wolframu powinna wynosić około 12%. Bez obniżenia odpuszczalności (podstawowej właściwości stali szybko tnącej) wolfram można zastąpić molibdenem w stosunku 1:(1,4÷1,5), pod warunkiem, że w stali będzie do 5% molibdenu. Taką zawartość wolframu lub $\Sigma \%W + 1,4\div 1,5\% Mo$ równą około 12% przyjęto dla większości współcześnie wytwarzanych gatunków oszczędnościowej stali szybko tnącej (OSS).

Deficyt w pozyskiwaniu pierwiastków w latach 70-80. XX w. zapoczątkował badania nad zastępowaniem drogich pierwiastków stopowych ich łatwo dostępnymi i tańszymi odpowiednikami, wśród których można wymienić aluminium, krzem, niob czy tytan [32, 114]. Celowe okazało się częściowe zastępowanie drogiego wanadu przez niob [21, 77]. Badania [32, 115] pozwoliły określić możliwość zastąpienia wanadu przez tytan. Celowość zastąpienia wolframu i molibdenu przez krzem została potwierdzona w badaniach [105], w wyniku czego opracowano nowe gatunki stali szybko tnącej z podwyższoną zawartością krzemu [28]. Doskonalenie składu chemicznego stali szybko tnącej doprowadziło do opracowania nieledeburytycznej stali szybko tnącej o właściwościach zbliżonych do konwencjonalnej stali szybko tnącej, ale wykazujących brak segregacji węglików [77, 113].

Najważniejszymi właściwościami stali przeznaczonej na narzędzia są: wysoka twardość, wysoka granica plastyczności i związana z tym odporność na odkształcenie trwałe, odporność na pękanie, odporność na ścieranie, szlifowalność, a w przypadku stali przeznaczonych na narzędzia pracujące w podwyższonej temperaturze także odpuszczalność, tzn. odporność na odpuszczające działanie wysokiej temperatury [26].

Bardzo ważnym zagadnieniem pod względem ekonomicznym jest prawidłowy dobór gatunków stali szybko tnącej do wyrobu określonych grup narzędzi [31]. Dobór ten powinien być dokonany na podstawie znajomości warunków eksploatacji narzędzi, rodzaju obciążenia, maksymalnej temperatury w procesie skrawania itp. Opłacalność wyboru stali o mniejszej zawartości dodatków stopowych musi być zawsze rozpatrywana kompleksowo, biorąc pod uwagę nie tylko nakłady na dodatki stopowe, lecz także koszty wytwarzania narzędzi i ich trwałość.

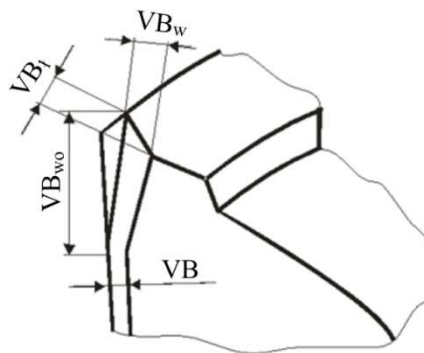
Spiekana stal szybko tnąca charakteryzuje się lepszą szlifowalnością niż stal wytwarzana konwencjonalnie o takim samym składzie chemicznym. Ponadto stal wytwarzana metodą prasowania izostatycznego na gorąco wykazuje większą podatność na szlifowanie niż stal spiekana próżniowo [150]. Narzędzia wykonane ze spiekanej stali szybko tnącej wykazują na ogół lepsze właściwości skrawne od narzędzi wykonanych ze stali wytwarzanej konwencjonalnie o tym samym składzie chemicznym [89]. Stal szybko tnąca odlewana konwencjonalnie charakteryzuje się niższymi właściwościami plastycznymi w porównaniu z właściwościami stali spiekanej o tym samym składzie chemicznym, ponieważ cechuje ją nierównomierne, pasmowe rozmieszczenie węglików pierwotnych [94]. Pomimo obróbki plastycznej stali konwencjonalnej trudno jest uzyskać jednorodną mikrostrukturę bez segregacji węglikowej. Mikrostruktura stali spiekanej po obróbce cieplnej jest złożona z drobnych równomiernie rozmieszczonych węglików w osnowie martenzytu, co sprawia, że stal ta charakteryzuje się większą odpornością na zużycie w porównaniu ze stalą wytwarzaną przez odlewanie [27, 135].

Stal szybko tnąca jest wciąż stosowana do produkcji narzędzi skrawających, mimo że narzędzia z węglików spiekanych, supertwardych materiałów i ceramiki zapewniają większą wydajność obróbki. Różnorodne zastosowanie stali szybko tnącej do wytwarzania narzędzi o złożonym kształcie nadal jest uwarunkowane połączeniem wysokiej twardości do 70 HRC, odpuszczalności do 640°C, wytrzymałości do 4000 MPa i ciągliwości, znacznie przewyższających odpowiadające im wartości dla węglików spiekanych. Stal szybko tnąca charakteryzuje się ponadto bardzo dobrą obrabialnością w stanie zmiękczonej.

Niemal połowę czasu przeznaczanego na obróbkę wiórową zajmują operacje toczenia, w dalszej kolejności operacje wiercenia, gwintowania oraz frezowania. Operacje frezowania, wiercenia, gwintowania, rozwiercania są przeprowadzane za pomocą narzędzi wykonanych w zdecydowanej większości ze stali szybko tnącej. W pozostałych rodzajach obróbki przeważają narzędzia z węglików spiekanych. Charakterystykę oszczędnościowej stali szybko tnącej oraz możliwości zapewnienia jakościowego wykonania narzędzi z oszczędnościowej stali szybko tnącej szczegółowo omówiono we wcześniejszych pracach autorów [54, 55].

2.3. Zmiany stanu wiertła ze stali szybko tnącej podczas obróbki żeliwa

W ogólnym przypadku miejsca zużycia wiertła występują na wszystkich powierzchniach ostrza wiertła (rys. 2.2). Powstawanie tych miejsc wraz z upływem czasu pracy charakteryzuje się jednak różną specyfiką w zależności od obrabianego materiału.

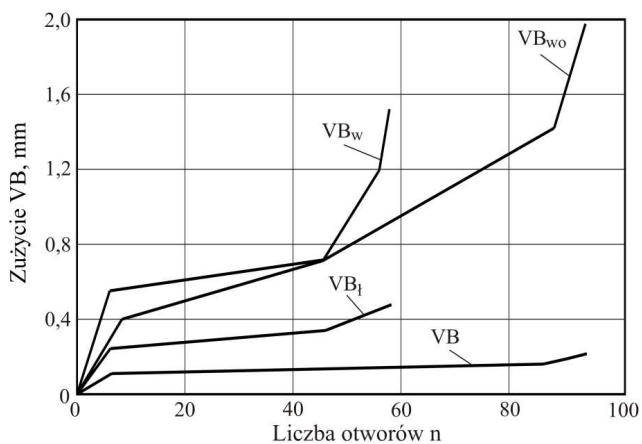


Rys. 2.2. Miejsca zużycia kontrolowane podczas badań trwałości wiertła przy obróbce stali żeliwa EN-GJS-500-7: VB_i – zużycie powierzchni przyłożenia ostrza wiertła, VB_i – zużycie powierzchni przyłożenia łysinki, VB_w – zużycie wierzchołka, VB_{w0} – zużycie powierzchni przyłożenia wierzchołka, opracowano na podstawie [52]

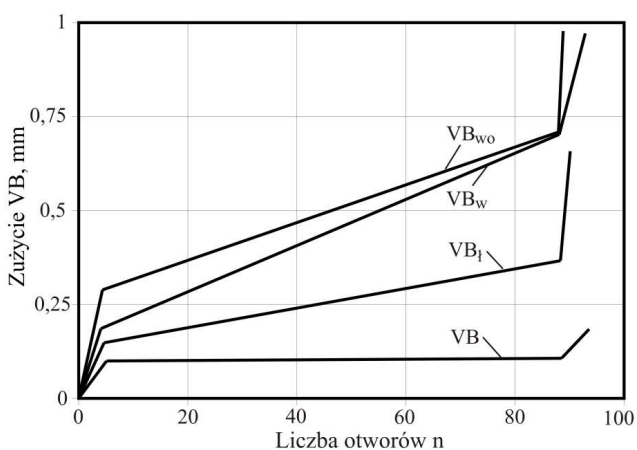
Jak wykazały badania Pancielejki [106], proces zużywania się wiertła podczas obróbki żeliwa wykazuje odmienny charakter. Wskaźnik VB (często stosowany jako jedyny wskaźnik charakteryzujący zużycie na powierzchni przyłożenia narzędzi) podczas obróbki żeliwa szarego nie oddaje rzeczywistego stopnia zużycia wiertła i może prowadzić do nadmiernego zużycia ostrzy narzędzia w innych strefach [106]. Ze względu na odmienny charakter zużycia narzędzi do wiercenia w stali i żeliwie są prowadzone prace nad wiertłami przeznaczonymi tylko do wiercenia w żeliwie, o specjalnej geometrii zapewniającej obniżenie zużycia ostrza i wartości siły skrawania [155].

Podczas obróbki żeliwa wskutek zużycia adhezyjno-ściernego zużycie rozwija się na powierzchniach przyłożenia. Wzdłuż głównej krawędzi skrawającej szerokość bruzdy zużycia wzrasta wraz z przybliżeniem się do wierzchołków wiertła. Ponadto szerokość bruzdy nie jest równomierna na pomocniczych powierzchniach przyłożenia (łysinkach). Maksymalna wartość zużycia występuje w miejscu przecięcia głównej powierzchni przyłożenia z powierzchnią łysinki. Rozwój zużycia w tym miejscu prowadzi do katastroficznego zużycia wiertła. W tym czasie na powierzchni natarcia i na przejściowej krawędzi skrawającej (ścinie) zużycie praktycznie nie występuje [56]. Ponieważ podczas obróbki żeliwa dominującym miejscem zużycia jest obszar na zewnętrznej powierzchni wiertła, zagadnienie to zostanie rozpatrzone szczegółowo celem określenia kryteriów stanu narzędzia. Miejsce to może być charakteryzowane (rys. 2.1): wielkością zużycia mierzoną na łysince od strony pomocniczej krawędzi skrawającej VB_{w0} , wielkością zużycia rozciągającą się od wierzchołka wzdłuż łysinki VB_i oraz wskaźnikiem VB_w , który określa linie przecięcia miejsca zużycia z po-

wierzchnią natarcia wiertła. Adekwatność tych wskaźników zużycia z wymaganiami prezentującymi kryterium stanu narzędzia określa się na podstawie badań. Dynamikę zużycia ostrza wiertła dla dwóch wartości parametrów skrawania przedstawiono na rys. 2.3 i 2.4. Badania przeprowadzono podczas wiercenia otworów o tej samej głębokości.



Rys. 2.3. Dynamika zużycia kontrolowanych miejsc wiertła dla $v_c = 20$ m/min, $f = 0,3$ mm/obr przy obróbce żeliwa EN-GJS-500-7 [48]



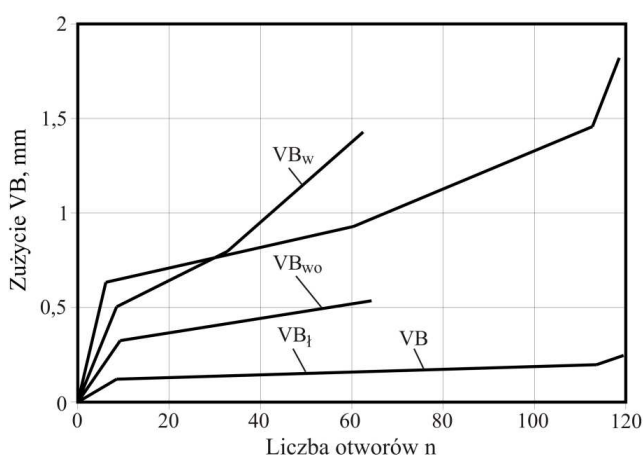
Rys. 2.4. Dynamika zużycia kontrolowanych miejsc wiertła dla $v_c = 40$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr przy obróbce żeliwa EN-GJS-500-7 [48]

Strefa normalnego zużycia rozpoczyna się przy następujących wartościach zużycia: $VB_w = 0,4$ mm, $VB_{wo} = 0,55$ mm, $VB = 0,1$ mm, $VB_t = 0,25$ mm (rys. 2.3). W strefie normalnego zużycia wykresy zależności kontrolowanych miejsc zużycia przedstawiają linie łamane, dzieląc na dwie części strefę normalnego zużycia. W pierwszej części następuje ciągle zwiększanie zużycia wierzchołków wiertła i powierzchni przyłożenia wierzchołków oraz zużycie wierzchołków w kierunku łysinki i głównej krawędzi skrawającej. Wykresy zależności mierzonych wartości zużycia są liniami prostymi, tzn. że intensywność zużycia w pierwszej części strefy jest stała. Po osiągnięciu wartości zużycia na powierzchni przyłożenia wierzchołków $VB_{wo} = 0,7$ mm rozpoczyna się jego szybki wzrost, aż do przerwania łysinki, co uniemożliwia dalszą kontrolę zużycia w tym kierunku. Wiertło może jednak dalej pracować normalnie, a zużycie pozostałych miejsc kontrolowanych wzrasta monotonicznie. Oznacza to, że utrata skrawności ostrza nie następuje, a szybki rozwój zużycia wierzchołków nie należy uważać za początek jego przyspieszonego zużycia. Intensywność zużycia wierzchołka w drugiej części strefy normalnego zużycia zwiększa się około 2,5-krotnie. Wykresy zmiany wartości zużycia wierzchołka w kierunku zużycia łysinki i głównej krawędzi skrawającej wyglądają podobnie, co oznacza, że nie różnią się między sobą. Zużycie głównej krawędzi skrawającej w pierwszej części strefy normalnego zużycia się nie zmienia. Jej nieznaczny wzrost można zaobserwować tylko w strefie drugiej. Strefa przyspieszonego zużycia następuje przy $VB_{wo} = 1,4$ mm. Zużycie głównej krawędzi skrawającej w tej strefie także nieznacznie wzrasta. Badania pokazały, że podczas eksploatacji wiertła szybki wzrost zużycia na powierzchni przyłożenia wierzchołków nie może być uważany za przyspieszony, ponieważ nie powoduje utraty skrawności wiertła, a jedynie zwiększa intensywność zużycia wierzchołków VB_w , powodując przejście zużycia wiertła do drugiej strefy normalnego zużycia. Utrata skrawności następuje w rezultacie zużycia wierzchołków, które rozpoczyna się przy $VB_{wo} = 1,4$ mm.

Podczas eksploatacji wiertła przy $v_c = 40$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr przyspieszone zużycie występuje na wszystkich kontrolowanych miejscach zużycia (rys. 2.4). Strefa normalnego zużycia rozpoczyna się przy $VB_w = 0,3$ mm, $VB_{wo} = 0,2$ mm, $VB_t = 0,15$ mm, $VB = 0,1$ mm. W strefie normalnego zużycia wartości wszystkich kontrolowanych miejsc można przedstawić za pomocą linii prostych nachylonych do osi rzędnych pod różnymi kątami, co oznacza, że intensywność zużycia w tych miejscach jest stała. Strefa przyspieszonego zużycia rozpoczyna się po osiągnięciu następujących wartości zużycia: $VB_{wo} = VB_w =$ około $0,55$ mm, $VB = 0,12$ mm i $VB_t = 0,35$ mm.

W strefie przyspieszonego zużycia zwiększa się nieco intensywność zużycia VB . Podczas eksploatacji wiertel przy tych parametrach skrawania przyspieszone zużycie i utrata skrawności wiertła następuje w rezultacie przyspieszonego zużycia wszystkich tych miejsc, gdzie kontrolowano zużycie.

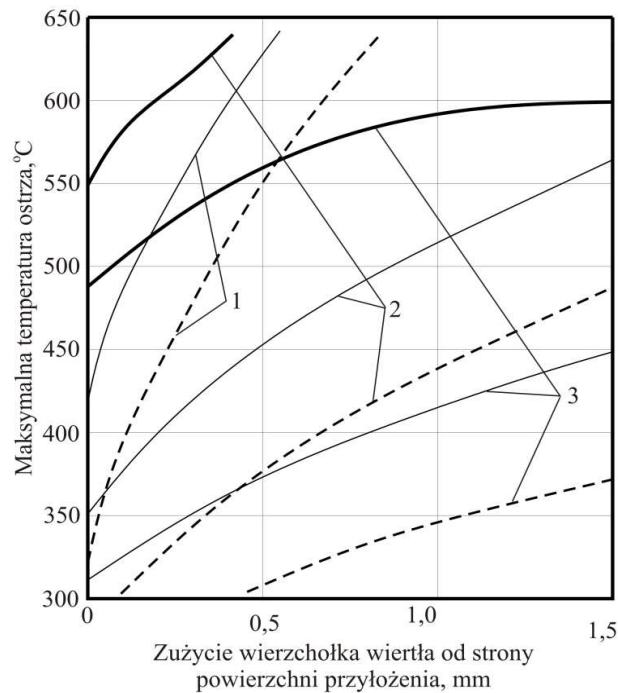
Dynamikę zużycia wiertła w funkcji liczby wykonanych otworów podczas wiercenia z parametrami $v_c = 20$ m/min, $f = 0,4$ mm/obr przedstawiono na rys. 2.5. Strefa normalnego zużycia rozpoczyna się przy większej wartości wskaźników zużycia niż w pierwszym ($v_c = 40$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr) i drugim przypadku ($v_c = 20$ m/min, $f = 0,4$ mm/obr). Jedynie wartość wskaźnika zużycia powierzchni przyłożenia VB na początku okresu normalnego zużycia jest taka sama, jak w poprzednich przypadkach, tj. równa około 0,1 mm. Bardziej intensywne zużycie ostrza wiertła w kontrolowanych miejscach prowadzi do tego, że po upływie pewnego czasu wartość zużycia VB_w rozpościera się już na całą szerokość łysinki i uniemożliwia pomiar zużycia VB_t , ponieważ zostaje zniszczona baza pomiarowa. Wiertło jednak nie traci swojej skrawności. Parametry zużycia VB_w , VB_t oraz VB nie mogą być zatem przyjęte jako kryterium stępienia. Przyspieszone zużycie następuje po osiągnięciu wartości zużycia wierzchołków VB_{wo} równej 1,5 mm, tj. wartości większej niż w pierwszym i drugim przypadku.



Rys. 2.5. Dynamika zużycia kontrolowanych miejsc wiertła dla $v_c = 20$ m/min, $f = 0,4$ mm/obr przy obróbce żeliwa EN-GJS-500-7 [50]

Do czasu przerwania łysinki niezależnie od parametrów skrawania i twardości żeliwa wzrost zużycia wierzchołków VB_{wo} określa proporcjonalny wzrost powierzchni miejsca zużycia. Stosunek między VB_{wo} a wymiarem VB_w i VB_t pozostaje stały przy różnych parametrach skrawania. Proporcjonalnie do wielkości VB_{wo} będzie się również zmieniać moc źródła ciepła powstającego na powierzchni zewnętrznej. W związku z tym przyspieszony wzrost zużycia VB_{wo} na etapie katastroficznego zużycia charakteryzuje całkowite zużycie wiertła związane z cieplną utratą właściwości stali szybko tnącej, co przedstawia zależność $T_{max}(VB_{wo})$ (rys. 2.6).

W całym zakresie parametrów skrawania tylko zużycie wierzchołków VB_{wo} spełnia pierwsze trzy wymagania stawiane kryteriom stanu narzędzia. Czwarte wymaganie informacyjne opisane cechami diagnostycznymi ocenia się podczas realizacji jednego z głównych etapów matematycznego podejścia do rozpracowywania systemów diagnozowania. Zagadnienie to będzie rozpatrzone dalej. Wartość VB_{wo} (rys. 2.6), przy której rozpoczyna się katastroficzne zużycie, stanowi kryterium zużycia wiertła, jeśli nie ma technologicznych ograniczeń w zakresie dokładności obróbki. Na podstawie badań eksperymentalnych można stwierdzić, że dopuszczalna wartość zużycia wartość VB_{wo} zasadniczo zależy od parametrów skrawania i właściwości materiału obrabianego.



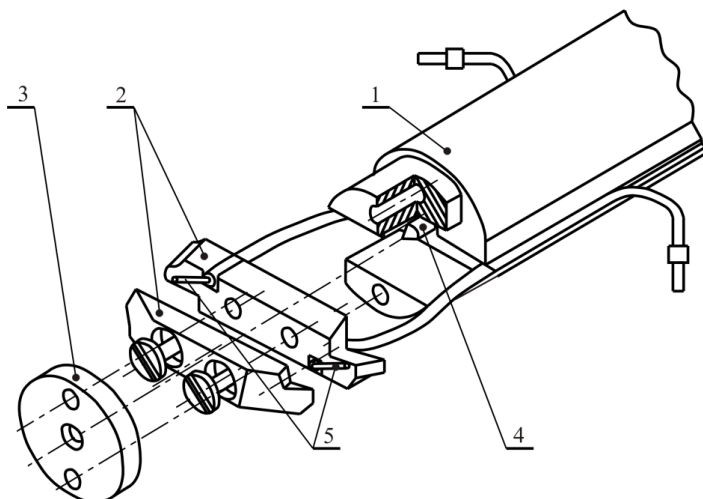
Rys. 2.6. Zależność temperatury T_{max} od zużycia wiertła dla prędkości skrawania: 1) $v_c = 40$ m/min, 2) $v_c = 30$ m/min, 3) $v_c = 25$ m/min, głębokość skrawania $a_p = 0,05$ mm (linia cienka), $a_p = 0,1$ mm (linia przerywana), $a_p = 0,2$ mm (linia pogrubiona), opracowano na podstawie [121]

Dla zapewnienia niezawodności procesu technologicznego i pełnego wykorzystania możliwości skrawnych narzędzia konieczne jest poznanie wartości VB_{wo} . Jest to szczególnie ważne dla narzędzi pracujących w ESP ze zmiennymi parametrami skrawania, przy założonym okresie trwałości ostrza T_c . Do określenia maksymalnej wartości zużycia można zastosować matematyczne zależności uwzględniające wpływ różnych parametrów na zmianę warunków skrawania.

Zależność matematyczną pozwalającą na wyznaczenie dopuszczalnej wartości VB_{wo} podczas wiercenia żeliwa ustalono na podstawie badań wpływu zużycia na maksymalną temperaturę T_{max} powstającą w części skrawającej wiertła. Wiadomo, że katastroficzne zużycie rozpoczyna się wtedy, kiedy T_{max} osiąga wartość powodującą nieodwracalne zmiany w strukturze i właściwościach stali szybkotnącej [122].

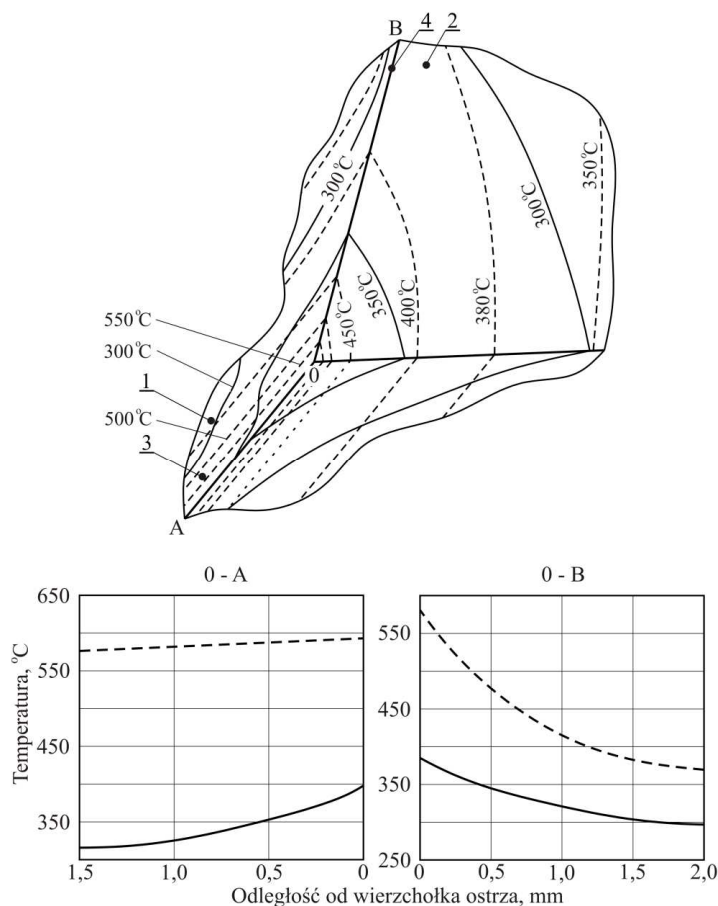
Określenie rozkładu temperatury w strefie dominującego miejsca zużycia VB_{wo} w ostrzu skrawającym wiertła i wartości maksymalnej temperatury w ostrzu wiertła T_{max} było przedmiotem badań Sinopalnikova i Eremenki [121]. Wyniki badań wstępnych wykazały obecność wysokich gradientów temperatury na powierzchni przyłożenia. Każdy odcinek krawędzi skrawającej można więc rozpatrywać oddzielnie, niezależnie od źródła ciepła sąsiedniego odcinka.

Do zbadania rozkładu temperatury w ostrzu wiertła zastosowano płytki skrawające (rys. 2.7) modelujące zewnętrzną część ostrza wiertła. Płytki ustalano w oprawce i mocowano specjalnymi zaciskami. Płytki wykonano ze stali HS6-5-2 (62÷64 HRC). Ich geometria odpowiada geometrii ostrza rzeczywistego wiertła: $\alpha = 10^\circ$, $\omega = 21^\circ$, $2\kappa_r = 120^\circ$. Promień cylindrycznej części wiertła odpowiadał wiertłu o średnicy 50 mm z odwrotnym stożkiem 0,1/100 mm, a szerokość łysinek wynosiła 1,8 mm. Temperaturę w różnych punktach ostrza skrawającego mierzono za pomocą półszlucowej termopary. Rozkład temperatury uzyskano przy wierceniu żeliwa szarego o różnej twardości (130÷200 HB) dla następujących parametrów skrawania $v_c = 25\div 50$ mm/min, $f = 0,05\div 0,5$ mm/obr.



Rys. 2.7. Model wiertła do pomiaru temperatury w punktach zewnętrznej średnicy wiertła: 1 – obudowa, 2 – płytki skrawające, 3 – oprawka, 4 – szczotka, 5 – termopary, opracowano na podstawie [121]

Rozkłady temperatury na powierzchni przyłożenia i natarcia oraz na powierzchni łysinek wyznaczono w zależności od zmierzonej temperatury wzdłuż głównej i pomocniczej krawędzi skrawającej dla różnych parametrów wiercenia żeliwa szarego. Przykład rozkładu temperatury przedstawiono na rys. 2.8. Wyznaczono wpływ parametrów skrawania na rozłożenie izoterm. Przy dużych posuwach i małych prędkościach skrawania izotermie rozkładają się zasadniczo wzdłuż głównej krawędzi skrawającej. Można zatem wnioskować, że główne źródło ciepła rozciągnięte jest wzdłuż głównej krawędzi skrawającej i powstaje wskutek tarcia na głównej powierzchni przyłożenia w procesie tworzenia wióra. Wraz ze wzrostem prędkości skrawania wzrasta moc źródła ciepła powstająca w rezultacie tarcia na łysinkach, a wraz ze zmniejszeniem się posuwu zmniejsza



Rys. 2.8. Rozkład temperatury na powierzchni natarcia (1) i na głównej powierzchni przyłożenia (2), wykres zmiany temperatury T wzdłuż głównej (3) i pomocniczej (4) krawędzi skrawającej, opracowano na podstawie [121]

się moc źródła ciepła rozciągniętego wzdłuż głównej krawędzi skrawającej i zaczyna dominować źródło skoncentrowane na wierzchołkach wiertła, dlatego też przy dużych prędkościach skrawania i małych posuwach rozłożenie izoterm nie ulega zmianie.

We wszystkich badanych przypadkach punkt z temperaturą T_{\max} znajduje się w jednym miejscu – w wierzchołku wiertła. Naniesienie powłoki TiN na powierzchnie skrawające wiertła praktycznie nie zmienia charakteru rozkładu temperatury [49]. O około 10% zmniejsza się wartość temperatury T_{\max} podczas zwiększenia prędkości skrawania v_c z 25 do 50 mm/min, co wiąże się ze zmniejszeniem mocy źródła ciepła powstającego w rezultacie tarcia na łysinkach. W przypadku narzędzi bez powłoki i narzędzi pokrywanych powłokami ochronnymi temperatura T_{\max} powstaje w wierzchołku wiertła. Wraz ze zwiększaniem zużycia na wierzchołkach charakter rozkładu temperatury w ostrzu ulega zmianie. Na powierzchni zużycia VB_{wo} pojawia się nowe źródło ciepła, które powoduje zmiany w rozłożeniu izoterm i wartości temperatury.

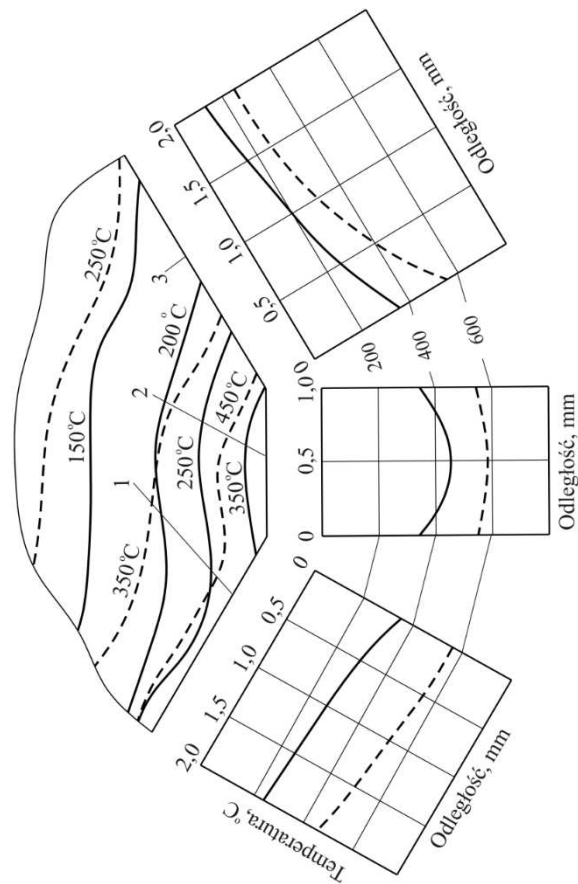
Aby wyjaśnić te zmiany, w pracy [122] badano rozkłady temperatury na zewnętrznej części wiertła zużytego do różnych wartości VB_{wo} , przy różnych parametrach skrawania. Przykład takich pól na powierzchni natarcia przy zużyciu narzędzia $VB = 1$ mm oraz zmiany temperatury wzdłuż głównej i pomocniczej krawędzi skrawającej przedstawiono na rys. 2.9. Ustalono, że w miarę zużywania się ostrza największe zmiany w rozkładzie izoterm występują przy mniejszych prędkościach skrawania i dużych posuwach. Jednakże we wszystkich przypadkach temperatura T_{\max} występuje mniej więcej w środku obszaru zużycia VB_w . Jak widać z zależności T_{\max} od zużycia VB_{wo} (rys. 2.10), wzrost T_{\max} intensyfikuje się wraz ze zwiększeniem prędkości skrawania v_c . Obecność powłoki TiN nie zmienia specyfiki rozkładu pól temperatury także przy różnym zużyciu narzędzia.

Badania pozwoliły zatem określić punkt z temperaturą T_{\max} na zewnętrznej części wiertła i określić wartość T_{\max} dla różnych warunków wiercenia otworów w częściach z żeliwa szarego i różnych wartościach zużycia VB_{wo} . Na podstawie uzyskanych wyników ustalono matematyczną zależność wiążącą zużycie VB_{wo} z temperaturą T_{\max} .

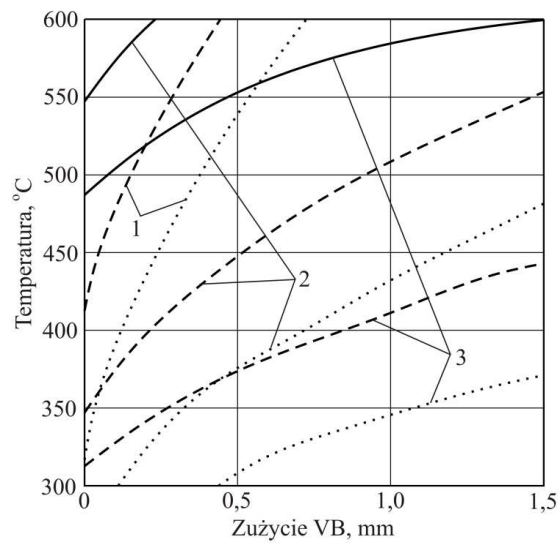
$$T_{\max} = C_1 v_c^{0,6} f^{1,4} HB^{0,3} + C_2 v_c^{0,6} HB^{0,3} + C_3 \left(\frac{v_c}{30} \right)^{2,6} HB^{0,3} VB_{wo}^{0,6} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.1)$$

gdzie C_1 , C_2 , C_3 – stałe współczynniki, których wartość zależy od specyfiki narzędzia.

W wyrażeniu (2.1) pierwszy, drugi i trzeci człon charakteryzują wzrost temperatury w rezultacie powstania źródła ciepła odpowiednio: w procesie tworzenia się wióra, w procesie tarcia na łysinkach i głównej powierzchni przyłożenia oraz w procesie tarcia na zużytych powierzchniach wierzchołków.



Rys. 2.9. Rozkład temperatury na powierzchni natarcia wiertła (zużycie $VB = 1$ mm), wykresy zmiany temperatury wzdłuż głównej (1) i pomocniczej (3) krawędzi skrawającej i powierzchni zużycia wierzchołków (2), opracowano na podstawie [121]



Rys. 2.10. Zależność temperatury T_{max} od zużycia wiertel przy prędkościach skrawania: 1) $v_c = 40$ m/min, 2) $v_c = 30$ m/min, 3) $v_c = 25$ m/min i posuwach $f = 0,05$ mm (linia pogrubiona), $f = 0,1$ mm (linia przerywana), $f = 0,2$ mm (linia kropkowana), opracowano na podstawie [121]

Podczas wiercenia narzędziem z powłoką TiN wartość C_2 jest niewiele mniejsza niż narzędziem bez powłoki, co oznacza, że dzięki powłoce temperatura narzędzia T_{\max} obniża się tylko w wyniku zmniejszenia tarcia na łysinkach i głównej powierzchni przyłożenia. W obliczeniach wyrażenie (2.1) wygodniej jest zastosować w postaci:

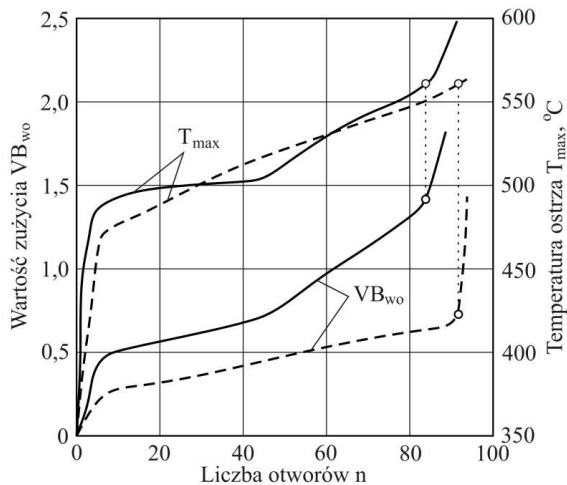
$$T_{\max} = C_1 v_c^{0,6} f^{1,4} HB^{0,8} + \left[C_2 + C_3 \left(\frac{v_c}{30} \right)^2 VB_{wo}^{0,6} \right] v_c^{0,6} HB^{0,3} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.2)$$

gdzie

$$C_3' = \frac{C_3}{30^{0,6}} \text{ [}^\circ\text{C]}.$$

Podczas obróbki przy różnych parametrach części z żeliwa szarego wiertłem ze stali HS 6-5-2, $\alpha = 10^\circ$, $2\varphi = 120^\circ$, $C_1 = 2,13$, $C_2 = 6,12$ dla narzędzi bez powłoki i $C_2 = 5,9$ dla narzędzi z powłoką TiN, $C_3 = 4,05$.

Wyrażenie (2.2) dla określonych warunków wiercenia przedstawia zatem zależność $T_{\max} = f(VB_w)$. Jeśli porówna się ją z zależnością $VB_w = f(T)$, to początek katastroficznego zużycia określający dopuszczalne zużycie VB_w pozwoli wyznaczyć temperaturę, przy której to zużycie jest dopuszczalne. Takie porównanie przedstawiono na rys. 2.11, na którym oprócz wykresów $T_{\max} = f(VB_{wo})$ wyliczonych według wzoru (2.2) przedstawiono statystyczne zależności wartości oczekiwanej zużycia VB_{wo} od liczby wykonanych otworów. Chociaż wartości VB_{wo} odpowiadające początkowi katastroficznego zużycia dla różnych parametrów są inne, to T_{\max} przy tych wartościach jest jednakowa i równa około $560 \div 570^\circ\text{C}$. Przedstawiona wartość temperatury jest temperaturą początku przemian nieodwracalnych w stali HS6-5-2.



Rys. 2.11. Oczekiwane (linia przerywana) i obliczone (linia ciągła) wartości zużycia i temperatury ostrza w zależności od liczby wykonanych otworów, opracowano na podstawie [121]

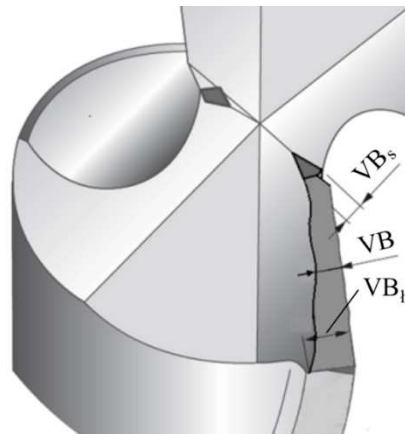
Korzystając z wyrażenia (2.2) stosowanego do wyznaczania VB_{wo} , można także obliczyć VB_{woDOP} – kryterium wyjścia z eksploatacji, po podstawieniu w miejsce T_{max} temperatury początku przemian nieodwracalnych materiału narzędzia T_k . Wówczas otrzymuje się:

$$VB_w = \left(\frac{900(T_k - C_1 v_c^{0,6} f^{1,4} HB^{0,8} - C_2 v_c^{0,6} HB^{0,3})}{C_3 v_c^{2,6} HB^{0,3}} \right)^{1,67} \quad (2.3)$$

W ten sposób rozwiązano zagadnienia dotyczące pierwszego etapu opracowania systemu diagnozowania dla wiertel przy wierceniu żeliwa, a mianowicie wykryto wszystkie możliwe zmiany stanu wiertel podczas ich eksploatacji, określono kryterium stanu i kryterium wyjścia z eksploatacji oraz uzyskano zależności do obliczeń ich dopuszczalnego zużycia.

2.4. Zmiany stanu wiertel podczas obróbki stali konstrukcyjnej

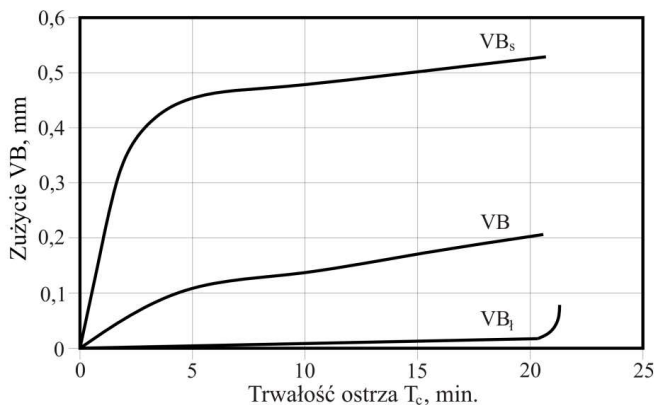
Wiertła z oszczędnościowej stali szybko tnącej podczas wiercenia otworów w stali C45 w stanie ulepszonym cieplnie ($R_m = 600$ MPa) lub C40 w stanie ulepszonym cieplnie ($R_m = 670$ MPa) zużywają się przede wszystkim na głównych powierzchniach przelżenia. Ze względu na odmienny charakter obróbki żeliwa oraz stali jako wskaźniki zużycia kontrolowane podczas badań trwałości wiertel przy obróbce stali konstrukcyjnej C45 wybrano parametry przedstawione na rys. 2.12.



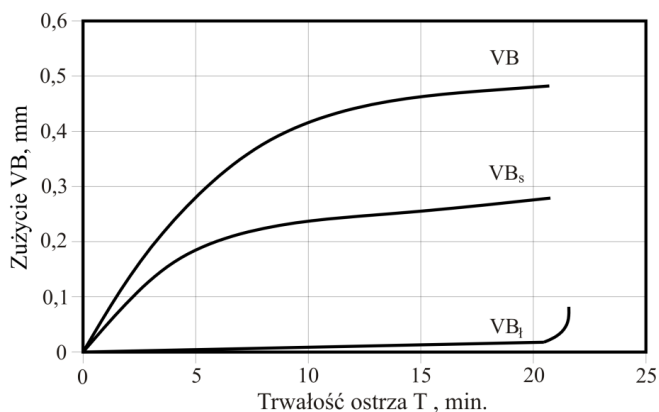
Rys. 2.12. Miejsca zużycia kontrolowane podczas badań trwałości wiertel przy obróbce stali C45: VB_s – zużycie poprzecznej krawędzi skrawającej, VB – zużycie powierzchni przyłożenia ostrza wiertła, VB_t – zużycie powierzchni przyłożenia łysinki, opracowano na podstawie [56]

W okresie przyspieszonego zużycia najszybciej zużywa się poprzeczna krawędź skrawająca VB_s . Zużycie na łysince VB_t jest prawie niezauważalne i następuje wzdłuż łysinki, aż do okresu poprzedzającego katastroficzne zużycie wiertła. Dynamikę zmian wartości zużycia w kontrolowanych miejscach wiertel ze stali HS2-5-1 podczas obróbki stali C45 przedstawiono na rys. 2.13 i 2.14.

Podczas obróbki stali C45 zużycie wiertel ze stali HS2-5-1 następuje na powierzchni przyłożenia VB dla obu wartości analizowanych parametrów skrawania. W okresie dotarcia wiertel intensywnie zużywa się przejściowa krawędź skrawająca, a zużycie łysinek jest prawie niezauważalne, aż do momentu rozpoczęcia się momentu katastroficznego zużycia wiertła. Zużycie na łysinkach VB_f mierzono, dokonując pomiaru średnicy wiertła na wierzchołkach.



Rys. 2.13. Dynamika zużycia w kontrolowanych miejscach wiertła przy $v_c = 40$ m/min i $f = 0,06$ mm/obr podczas obróbki stali C45, opracowano na podstawie [56]



Rys. 2.14. Dynamika zużycia w kontrolowanych miejscach wiertła przy $v_c = 20$ m/min i $f = 0,2$ mm/obr podczas obróbki stali C45, opracowano na podstawie [56]

Żadne z miejsc zużycia (rys. 2.13, 2.14) nie może być przyjęte jako kryterium stanu wiertła podczas jego eksploatacji, aż do katastroficznego zużycia. Wartości zużycia VB i VB_s monotonicznie wzrastają w okresie normalnego zużycia nie przedstawiają początku katastroficznego zużycia, a ich wartości są

różne przy różnych parametrach skrawania, np. VB_s dla przyjętych warunków może przyjmować wartości około 0,55 mm (rys. 2.13) i 0,2 mm (rys. 2.14). Odwrotnie jest w przypadku VB_t – nie przedstawia on zmian w stanie wiertła w okresie normalnego zużycia. W przypadku obróbki stali konstrukcyjnej nie ma więc jednego miejsca zużycia, jak to było podczas obróbki żeliwa (VB_{wo}), którego miara może być stosowana jako kryterium stanu wiertła, a przy katastroficznym zużyciu – jako kryterium wyjścia z eksploatacji.

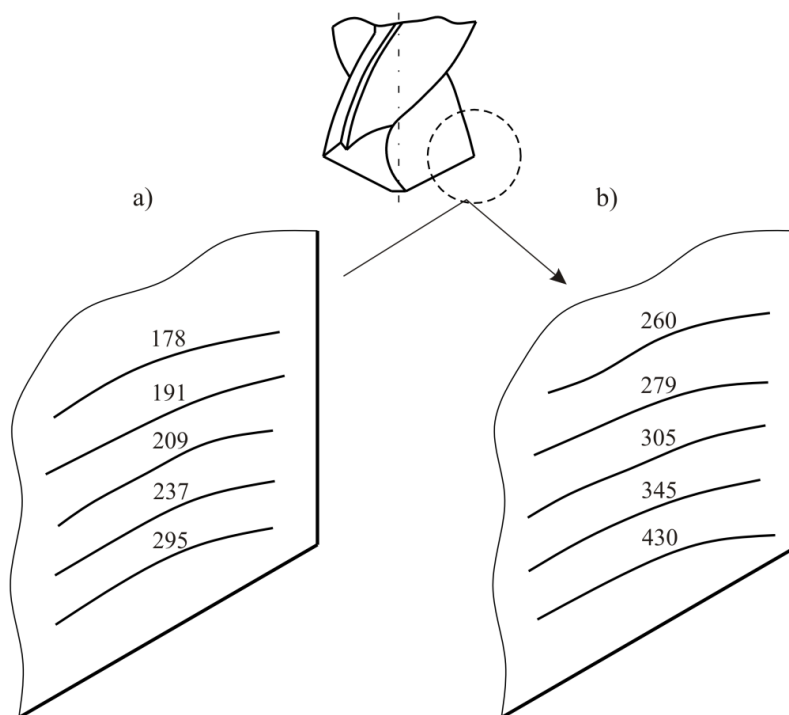
Specyfika zużycia wiertel podczas obróbki stali węglowych polega na tym, że w procesie skrawania zużycie ma miejsce przede wszystkim na głównych powierzchniach przyłożenia, ale wyjście narzędzia z eksploatacji następuje na skutek katastroficznego zużycia na pomocniczych powierzchniach przyłożenia, tj. na łysinkach. Aby zapobiec temu zjawisku, konieczne jest określenie na podstawie badań dopuszczalnego zużycia wiertła, które będzie stanowić kryterium wyjścia narzędzia z eksploatacji w systemie diagnozowania.

Należy podkreślić, że w ogólnym przypadku katastroficzne zużycie narzędzia ze stali szybko tnącej jest związane ze wzrostem temperatury w ostrzu skrawającym do wartości powodującej zmiany właściwości materiału narzędzia. W przypadku wiertel o określonej specyfice ich zużycia temperatura wzrasta wskutek wzrostu mocy źródła ciepła na głównych powierzchniach przyłożenia. Na etapie normalnego zużycia od źródeł tych nagrzewa się część skrawająca wiertła, ponieważ miejsca zużycia na łysinkach w tym okresie zużycia są niewielkie [49, 50]. Potwierdzeniem są badania Sinopalnikova i Eremenki [121]. Rozkład izoterm na powierzchni natarcia wiertła (rys. 2.15) sugeruje, że przepływ ciepła rozprzestrzenia się od głównej krawędzi skrawającej. W nagrzewaniu wiertła źródło ciepła w łysinie bierze udział tylko wtedy, kiedy rozpoczyna się katastroficzne zużycie łysinki. Należy podkreślić, że przed katastroficznym zużyciem temperatura na łysinkach jest niższa niż w pobliżu głównej krawędzi skrawającej (rys. 2.15a, b) i niższa niż temperatura spadku twardości stali szybko tnącej. W warunkach produkcyjnych i laboratoryjnych jako kryterium zużycia częste zastosowanie ma tzw. skrzywienie [38, 44, 98] – na początku katastroficznego zużycia pojawia się charakterystyczny sygnał dźwiękowy, który jest związany tylko ze zmianą zachodzących procesów na powierzchniach styku narzędzia z materiałem obrabianym.

Badania sygnału emisji wibroakustycznej wykazują znaczny wzrost amplitudy drgań już przed początkiem katastroficznego zużycia [53]. Jeśli jednak w tym momencie przerwie się proces wiercenia i wysunie wiertło z otworu, to nie zaobserwuje się nowych jakościowych zmian na powierzchni styku wiertła. Wiertło pozostanie zdolne do pracy (w stanie zdatności) podczas wiercenia następnego otworu i do określonej głębokości otworu wartość amplitudy sygnału będzie stała, praktycznie niezależna od wartości zużycia VB . Po osiągnięciu tej głębokości wiercenia wzrasta amplituda, przy czym jej wzrost rozpoczyna się tym wcześniej, im większe będzie zużycie VB . W związku z tym, mimo że miejsce zużycia na powierzchni przyłożenia nie jest podstawowym/zasadniczym

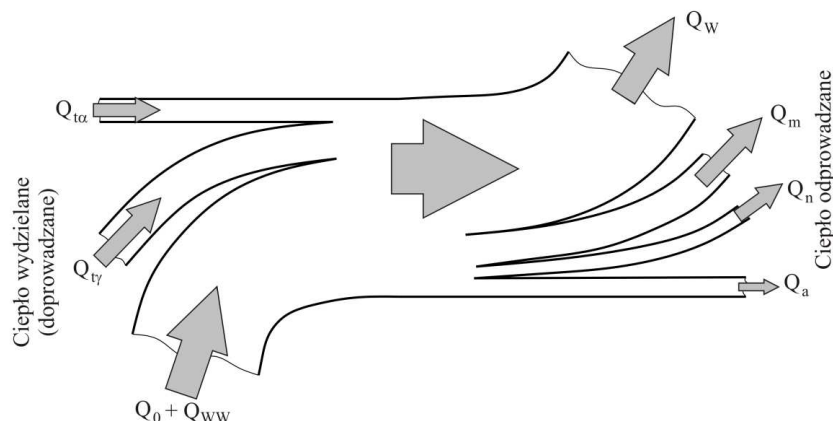
źródłem sygnału akustycznego, po przekroczeniu pewnej wartości zużycia VB powstają warunki do zwiększenia amplitudy sygnału wibroakustycznego. Ciepło wytwarzane podczas wiercenia w strefie skrawania rozchodzi się między środowiska uczestniczące w procesie. Jak wiadomo z teorii skrawania, ponad 50% całego ciepła jest przekazywane w materiał obrabiany, przy czym ciepło wzrasta ilościowo wraz ze wzrostem miejsca zużycia jako źródła ciepła. Ilość ciepła wydzielonego w jednostce czasu (strumień ciepła) odpowiada w przybliżeniu mocy skrawania, która wynika bezpośrednio z pracy skrawania [149]. Określając składniki pracy skrawania, można wydzielić następujące źródła ciepła (rys. 2.16) [149]:

- $Qt\alpha$ – tarcie powierzchni przyłożenia ostrza o materiał obrabiany,
- $Qt\gamma$ – tarcie wióra o powierzchnię natarcia ostrza,
- $Q_o + Q_{ww}$ – praca odkształceń plastycznych i dekohezji materiału oraz odkształceń poprzedzających poślizg,
- Q_w – ciepło odprowadzone przez wiór,
- Q_m – ciepło odprowadzone przez przedmiot obrabiany,
- Q_n – ciepło odprowadzone przez narzędzie,
- Q_a – ciepło odprowadzone innymi drogami.



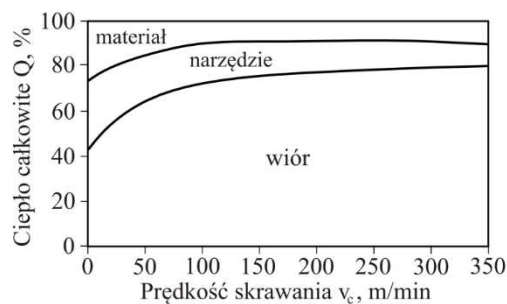
Rys. 2.15. Rozkład temperatury na powierzchni natarcia wiertła przy obróbce stali 45H; parametry skrawania $v_c = 28$ m/min, $f = 0,2$ mm/obr, opracowano na podstawie [121]

Na rysunku 2.16 przedstawiono charakterystyczne sposoby odprowadzania ciepła ze strefy skrawania, natomiast na rys. 2.17 procentowy udział strumieni ciepłych w zależności od prędkości skrawania w stali niestopowej.



Rys. 2.16. Źródła ciepła i rozpraszanie ciepła w strefie skrawania, opracowano na podstawie [149]

Rys. 2.17. Zmiana procentowego rozkładu strumieni ciepłych, opracowano na podstawie [39]



Podczas wiercenia w stali konstrukcyjnej źródło ciepła powstaje w pobliżu obszaru zużycia na głównej powierzchni przyłożenia VB . Moc tego źródła ciepła jest określona równaniem (2.4) i zwiększa się wraz ze wzrostem zużycia VB . Wraz ze wzrostem zużycia VB zwiększa się również cieplna deformacja obrabianej części.

$$Q = C \cdot R_m \cdot VB \cdot v_c \text{ [kW]} \quad (2.4)$$

gdzie: C – stała materiałowa,

R_m – wytrzymałość na rozciąganie materiału obrabianego [MPa],

VB – zużycie na powierzchni przyłożenia wiertła [mm],

v_c – prędkość skrawania [mm/min].

Wraz ze wzrostem zużycia ostrza wiertła w częściach typu korpus wiercone otwory deformują się tak, że ich średnica się zmniejsza. Po upływie czasu, kiedy deformacja przewyższy luz powstający w rezultacie odwrotnej stożkowatości wiertła, obrabiana powierzchnia otworu będzie powodować zmianę powierzchni styku na łysinkach, ich zużycie i powstawanie katastroficznego zużycie wiertła. Dla potwierdzenia przedstawionej hipotezy w pracy [122] przeprowadzono obliczenia cieplne deformacji obrabianej części. Stan cieplny części można obliczyć numerycznie, m.in. metodą różnic skończonych (MRS) [124, 140], metodą elementów skończonych (MES) [4, 40, 41] oraz metodą elementów brzegowych (MEB) [16, 30].

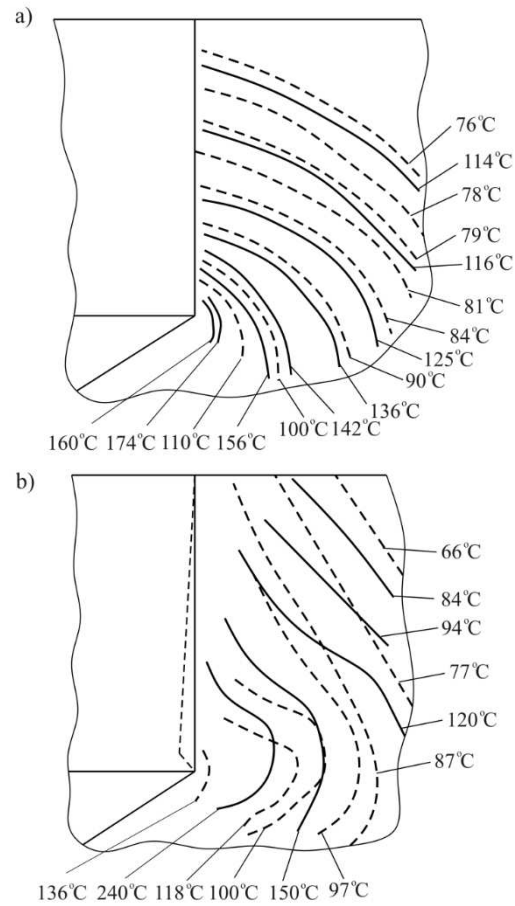
Całkowite ciepło powstające podczas skrawania odniesione do jednostki czasu można wyznaczyć analitycznie z zależności [128]:

$$Q = \frac{F_c \cdot v_c}{427} \text{ [kcal/min]} \quad (2.5)$$

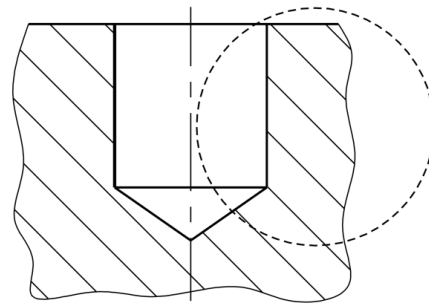
gdzie: F_c – obwodowa siła skrawania [N],
 v_c – prędkość skrawania [m/min].

Stan cieplny (rozkład temperatury) można określić eksperymentalnie za pomocą półszlucowej termopary. Obliczone i określone eksperymentalnie rozkłady temperatury w częściach ze stali C45 przedstawiono odpowiednio na rys. 2.18a, 2.18b dla ostrych i zużytych ($VB = 0,3$ mm) wiertel o średnicy $D = 10$ mm. Do obliczonego rozkładu temperatury zastosowano standardowy program do statycznych zadań deformacji metodą elementów skończonych. Wyznaczono również cieplne przemieszczenia powierzchni otworu (rys. 2.19) przy parametrach wiercenia $v_c = 26$ mm/min, $f = 0,22$ mm/obr. W przypadku wiercenia ostrym wiertłem wartość przemieszczenia powierzchni otworu wynosi 2 μm , a zużytym $VB_{\text{max}} = 0,3$ mm około 4 μm . Zmianę kształtu otworu w procesie wiercenia zużytym wiertłem przedstawiono na rys. 2.18b. W przypadku obliczonego rozkładu temperatury w części (rys. 2.18a) wartość nacisków przy wierceniu ostrym wiertłem wynosiła około 20 MPa, a wiertłem zużytym około 40 MPa. W rzeczywistości ostatnia wartość nacisku może być znacznie większa, ponieważ zmierzone za pomocą półszlucowej termopary wartości temperatury w części są wyższe niż obliczone MES.

W miejscach kontaktu łysinki i otworu mają miejsce procesy analogiczne do tych występujących przy zgrzewaniu tarciovym lub wierceniu tarciovym [98]. Do realizacji zgrzewania konieczne są naciski, prędkość i czas takiego samego porządku, jak w rozpatrywanym przypadku wiercenia [9]. Procesy zachodzące w miejscu styku w tych warunkach prowadzą do katastroficznego zużycia na łysinkach. Początek tych procesów obrazuje zwiększenie amplitudy sygnału akustycznego i wzrost momentu tarcia powstającego na łysinkach wiertła. Badania przeprowadzono, rozdzielając moment wiercenia i siłę osiową

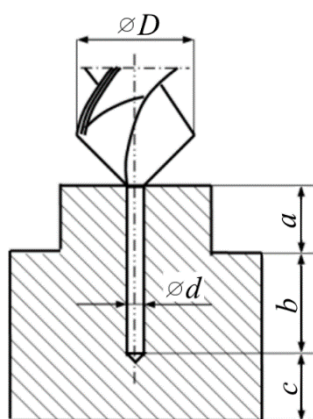


Rys. 2.18. Pola wartości temperatury w obrabianej części: a) obliczone, b) zmierzone eksperymentalnie dla zużycia $VB = 0$ (linia przerywana), $VB = 0,3$ mm (linia ciągła); obrabiany materiał – stal C45, parametry skrawania $v_c = 28$ m/min, $f = 0,22$ mm/obr, opracowano na podstawie [121]



Rys. 2.19. Analizowany obszar rozkładu temperatury

powstające podczas wiercenia według każdego elementu części skrawającej wiertła. W tym celu prowadzono wiercenie na specjalnych próbkach ze stali C45 przedstawionych na rys. 2.20.



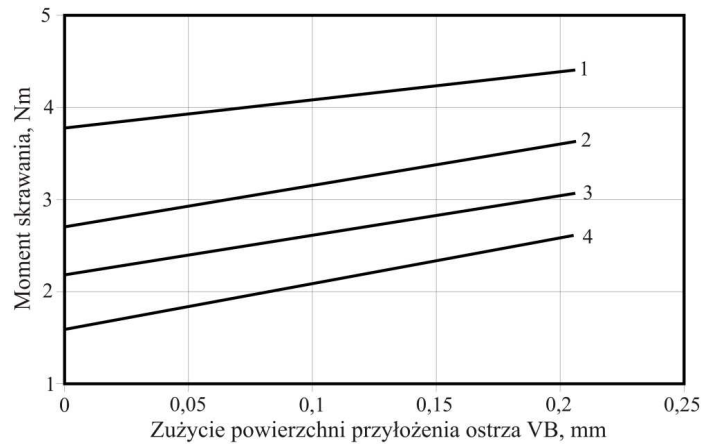
Rys. 2.20. Próbkę do pomiarów oporów skrawania: a – odcinek skrawania głównymi krawędziami skrawającymi, b – odcinek skrawania głównymi krawędziami skrawającymi i łysinkami, c – odcinek skrawania wszystkimi krawędziami skrawającymi

Podczas wiercenia części a określono wartość siły osiowej i momentu skrawania powstających przy wierceniu głównymi krawędziami skrawającymi. Obliczając wartości siły osiowej i momentu wiercenia uzyskane na długości odcinka a oraz na długości odcinka b , określono wartości siły osiowej i momentu przypadające na łysinki. Na podstawie różnicy wartości osiowej siły i momentu na odcinku b i c wyznaczono wartość siły skrawania i momentu przypadające na ścin. Badania realizowano wiertłami ostrymi i zużytymi o średnicy 10 mm. Średnica otworu wstępnego wynosiła $d = 4$ mm. Wartości siły osiowej i momentu skrawania mierzono za pomocą dynamometru firmy Kistler 9123. Dynamometr był ustawiony na wiertarce tak, aby oś wiertła przechodziła przez środek stołu.

Ustalono, że wartość momentu skrawającego, który powstaje na głównych krawędziach skrawających i ścinie, zmieniają się w małym stopniu wraz ze wzrostem zużycia odpowiednio VB i VB_s . W tym czasie przy braku zużycia na łysinkach obserwuje się zwiększenie momentu przypadającego na łysinki wraz ze wzrostem zużycia VB (rys. 2.21).

Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że zużycie VB odgrywa w przedstawionym mechanizmie zużycia wiertła rolę czynnika określającego cieplny i deformacyjny stan obrabianej części, prowadzący wskutek tego do nieoczekiwanego katastroficznego zużycia łysinek. Dopuszczalna wartość VB , od której rozpoczyna się katastroficzne zużycie, powinna oczywiście zależeć od warunków skrawania, a przede wszystkim od parametrów skrawania. Porównanie specyfiki zużycia wiertła ze stali szybko tnącej przy obróbce żeliwa i stali powoduje, że podejście do diagnozowania stanu narzędzia w każdym przypadku powinno być różne. W przypadku obróbki żeliwa dopuszczalny stan wiertła można wyznaczyć, porównując bieżące wartości VB_{wo} z dopuszczalną wartością VB_{wodop} wyznaczoną ze wzoru (2.3) po osiągnięciu temperatury przemian nieodwracalnych w stali szybko tnącej. Podczas obróbki stali określenie wartości VB_{dop} , przy której rozpoczyna się katastroficzne zużycie łysinek wskutek cieplnych deformacji otworu, nie jest możliwe. Wyjaśnić to można tym, że dla

różnych środowisk różne są wartości cieplnych deformacji otworu prowadzących do katastroficznego zużycia ostrza oraz że istnieje złożony związek między zużyciem na powierzchniach przyłożenia VB i wielkością cieplnej deformacji otworu.



Rys. 2.21. Zależność momentu skrawania od zużycia ostrza na powierzchni przyłożenia VB przypadającego na łysinki wiertła: 1) $v_c = 19,4$ m/min, $f = 0,22$ mm/obr, 2) $v_c = 27,7$ m/min, $f = 0,11$ mm/obr, 3) $v_c = 27,7$ m/min, $f = 0,16$ mm/obr, 4) $v_c = 38,5$ m/min, $f = 0,11$ mm/obr, opracowano na podstawie [121]

Uzyskane wyniki badań nie mogą być wykorzystane do opracowania systemu diagnozowania wiertel podczas wiercenia stali węglowych. W tym przypadku występuje niejednoznaczna specyfika zarówno rozwoju miejsc zużycia, jak i katastroficznego zużycia wiertła.

W przypadku wiertel o średnicach 12÷36 mm i głębokościach skrawania nieprzekraczających $2,5d$ oraz wartościach posuwu 0,2÷0,4 mm/obr udział poszczególnych oporów cząstkowych przy wierceniu jest następujący [123]:

$$F_\chi \approx 50\%, F_t \approx 9\%, F_s \approx 41\% \text{ całkowitej siły osiowej } F,$$

$$M_\chi \approx 50\%, M_t \approx 9\%, M_s \approx 41\% \text{ całkowitego momentu obrotowego } M,$$

gdzie: χ – opory pochodzące od głównych krawędzi skrawających,

t – opory pochodzące od łysinek,

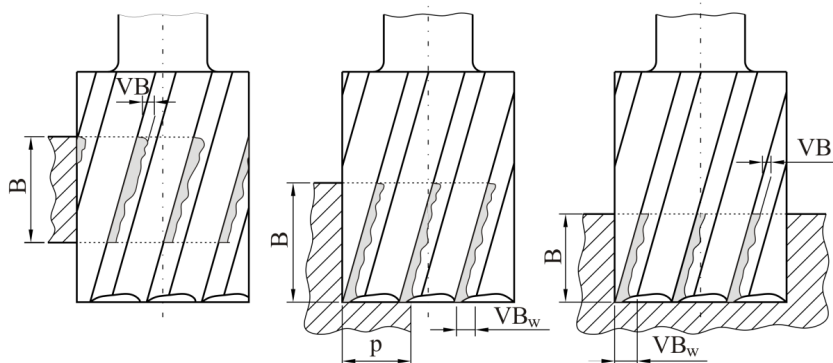
s – opory pochodzące od ścina.

2.5. Zużycie i stan frezów walcowo-czołowych

Prawidłowości dotyczące powstawania miejsc zużycia i przyczyn wyjścia z eksploatacji przedstawione w pracy [121] dotyczą również frezów walcowo-czołowych wykonanych ze stali szybkotnącej. Należy wspomnieć, że powsta-

wanie dominującego miejsca zużycia na zębie freza zależy od geometrii obrabianej powierzchni, a intensywność zużycia – od stosowanego schematu frezowania.

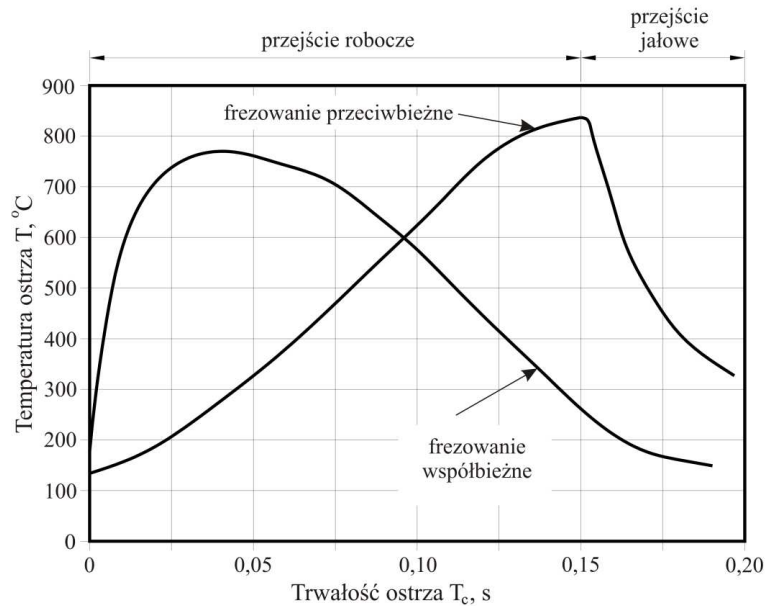
Frez walcowo-czołowy może obrabiać powierzchnie płaskie albo kształtowe tylko swoją częścią cylindryczną (rys. 2.22). W pozostałych przypadkach skrawania z szerokością frezowania B bierze udział zarówno cylindryczna, jak i czołowa część freza.



Rys. 2.22. Powierzchnie obrabiane frezem walcowo-czołowym i miejsca zużycia zęba, opracowano na podstawie [121]

Zużycie zębów freza następuje na powierzchni przyłożenia w części cylindrycznej, a zużycie pomocniczej krawędzi skrawającej – na części czołowej. Najbardziej intensywne zużycie występuje na wierzchołkach głównej i pomocniczej krawędzi skrawającej, gdzie określa się zużycie VB_w . Rozwój dominującego zużycia na powierzchni przyłożenia można tłumaczyć tym, że ząb freza skrawa materiał z części obrabianej z małą grubością warstwy skrawanej (h_D), ponieważ nawet maksymalną grubość (h_{Dmax}) na odcinku kontaktu freza z częścią obrabianą określa się małą wartością posuwu na ząb $h_{Dmax} = f_z \cdot \sin \kappa_r$. Jako kryterium stanu narzędzia w zależności od rodzaju obrabianej powierzchni przyjmuje się więc albo VB , albo VB_w . Jeśli nie ma jakiegokolwiek ograniczenia technologicznego, to jako kryterium wyjścia z eksploatacji przyjmuje się wartość optymalnego zużycia. Dopuszczalna wartość zużycia VB_{dop} może być określona według metodyki, która jest oparta na eksperymentalnych zależnościach temperatury T_{max} w części skrawającej zębów od wartości dominującego zużycia i warunków skrawania. Maksymalna temperatura w przypadku pracy zębów z małą h_D występuje w wierzchołku ostrza skrawającego [122]. Określenie VB_{dop} dla frezów walcowo-czołowych jest złożone, ponieważ zależność $T_{max} = f(VB, v_c, f, a_p, B)$ jest różna przy frezowaniu współbieżnym i przeciwbieżnym wskutek różnych wartości temperatury T_{max} powstającej w wierzchołku ostrza skrawającego zęba. Na rysunku 2.23 przedstawiono krzywe nagrzewania w okresie cyklu pracy i ochładzania przy ruchu swobodnym uzyskane dla współbieżne-

go i przeciwbieżnego frezowania przy pozostałych warunkach stałych. Utratę trwałości ostrza określała wartość dopuszczalnego zużycia na powierzchni przyłożenia VB_{dop} .



Rys. 2.23. Krzywe zmian temperatury w ostrzu freza, opracowano na podstawie [121]

Wskutek różnej eksploatacji frezów walcowo-czołowych (różne rodzaje obrabianych powierzchni i różne schematy frezowania) wartości VB_{dop} obliczonych z zależności (2.3) praktycznie się nie stosuje. Dopuszczalne zużycie określano eksperymentalnie. Rozpatrzone przykłady poszukiwania specyfiki zużycia narzędzia, przyczyn wyjścia narzędzia z eksploatacji oraz kryterium jego stanu prowadzi do następujących wniosków:

- do opracowywania systemów diagnostyki nie zawsze wystarczają znane z teorii skrawania zasady powstawania miejsc zużycia i przyczyn wyjścia narzędzia z eksploatacji; aby je znaleźć przy zadanych warunkach eksploatacji, często należy przeprowadzić dodatkowe badania,
- oprócz rozpatrywanych przyczyn wyjścia narzędzia z eksploatacji wskutek zużycia należy również rozpatrzeć przyczyny powstające na skutek wykruszenia,
- wyjaśnieniu specyfiki zużycia i wyjścia z eksploatacji w określonych warunkach pracy narzędzia będą służyć środki i algorytmy diagnozowania narzędzia dla tych warunków.

3. Diagnostyczne cechy stanu narzędzia i procesu skrawania

3.1. Określenie zadań rozwiązywanych systemami diagnostycznymi

W rozdziale 1.1 przedstawiono wzajemny związek podstawowych parametrów (rys. 1.3): stanu narzędzia, obrabianej części, kształtu wióra oraz funkcjonalnych parametrów procesu skrawania. Pozwala to na stosowanie każdego z parametrów jako diagnostyczną cechę innego związanego z nim parametru stanu dowolnego obiektu diagnozowanego. Jako cechy jakościowe wykorzystuje się czwarty blok parametrów sygnału charakteryzujący różne zjawiska fizyczne towarzyszące procesom zmian stanu materiału obrabianego i narzędziowego oraz warunków kontaktu w strefie skrawania. Dla zwiększenia technologicznej niezawodności obróbki mechanicznej można ustalić zakres zadań, które są rozwiązywane przez systemy diagnozowania. Diagnozując stan narzędzia, stawia się zadania dotyczące określenia wielkości aktualnego i dopuszczalnego zużycia na powierzchni natarcia i przyłożenia także w kierunku promieniowym, określenia wykruszeń i deformacji plastycznej krawędzi skrawającej, powstawanie narostów oraz zniszczenia narzędzia. Podczas diagnozowania stanu obrabianej części wyznacza się wymiary i gładkość obrabianej powierzchni, a podczas diagnozowania powstającego wióra – kształt i typ wióra. Rozpatrywane systemy diagnozowania mogą również pełnić funkcje związane z adaptacją procesu technologicznego i ochrony przed sytuacją awaryjną. Po określeniu kryteriów wyjścia narzędzia z eksploatacji kolejnym etapem prac w zakresie systemów diagnozowania jest ustalenie informacyjnych diagnostycznych oznak stanu obiektów diagnozowania. Rozpatrzmy najczęściej stosowane w praktyce oznaki diagnozowania procesu i narzędzia.

3.2. Siła skrawania – diagnostyczna cecha stanu procesu i narzędzia

3.2.1. Siłowe diagnostyczne cechy parametrów stanu

Siła niezbędna do odkształcenia warstwy skrawanej, oddzielenia jej od materiału w postaci wióra, odkształcenia wióra oraz pokonania oporów tarcia, występujących głównie między narzędziem a obrabianym przedmiotem, jest nazywana siłą skrawania [123]. Siła skrawania oddziałuje na narzędzie skrawające,

elementy obrabiarki oraz przedmiot obrabiany, mogą wywołać jego uszkodzenie, jeżeli jej wartość i kierunek przekroczą wartości dopuszczalne. Wartość siły skrawania może się zmieniać w szerokich granicach [9, 104, 129].

Z teorii procesu skrawania wynika, że siła oporu względem ruchu narzędzia skrawającego przy obrabianiu części składa się z następujących składowych [65, 127, 128]:

- siły przeciwstawiania się deformacjom plastycznym i oddzielaniu wióra z warstwy wierzchniej części obrabianej,
- siły związanej ze spływem wióra po powierzchni natarcia,
- siły zginania i łamania wióra,
- oporu przemieszczenia narzędzia powstającego na jego powierzchni przyłożenia.

W układzie odniesienia narzędzia składowe siły całkowitej oznacza się indeksem odpowiadającym rozpatrywanemu ruchowi. Wypadkowa wszystkich tych składowych jest siłą skrawania R . Wiadomo, że każdej z wymienionych składowych towarzyszy nie tylko zmiana czynników (wskaźników) procesu skrawania, lecz także zmiany podczas obróbki odpowiednich parametrów stanu narzędzia, materiału obrabianego i wióra. W związku z tym każda składowa siła skrawania mogłaby spełniać rolę diagnostycznej cechy zmiany związanych z nią parametrów stanu. Zwiększenie oporu ruchu narzędzia na powierzchni przyłożenia jest więc oznaką wzrostu powierzchni zużycia na powierzchni przyłożenia. Zmiana przy założonych parametrach procesu deformacji plastycznej w strefie tworzenia wióra może być spowodowana zużyciem powierzchni natarcia. Powstawanie bruzdy zużycia prowadzi do zwiększenia faktycznego kąta natarcia. Jednakże rozdzielenie pomiaru każdej z wymienionych składowych siły jest związane z dużymi trudnościami technicznymi. Dostępne są urządzenia pomiarowe składowych siły R rozłożonych według współrzędnych x , y , z oraz średniej wartości wektora wypadkowego \bar{R} , amplitudy A_R i częstotliwości f_R drgań (rys. 1.3). Wartości tych parametrów niosą również znaczącą informację ze strefy skrawania i mogą być stosowane jako diagnostyczne cechy stanu narzędzia oraz wióra. Fizyczne informacje o procesie skrawania i pracy narzędzi pozwalają prognozować możliwości wykorzystania siłowych diagnostycznych cech dla różnych zmieniających się parametrów stanu. Przewidywaną informacyjność diagnostyczną wybranych parametrów procesu skrawania przedstawiono w tab. 3.1.

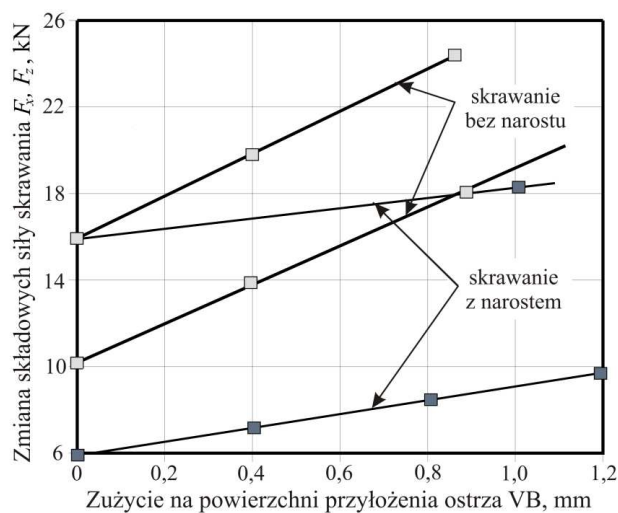
Wzajemny związek parametrów stanu procesu skrawania przedstawiony w tab. 1.2 i 3.1 pozwala na świadomy wybór diagnostycznych cech kontrolowanych parametrów stanu obiektów. Jednakże ostateczne wnioski o praktycznym zastosowaniu takiej lub innej cechy można podjąć tylko przez porównania ich informacyjności wykrytej w wyniku badań eksperymentalnych. Tylko eksperyment w konkretnych warunkach skrawania pozwala uwzględnić możliwy, często nieprzewidywalny specyficzny przebieg procesu pracy narzędzia i wzajemne związki parametrów stanu z prognozowanymi diagnostycznymi cechami. Można

Tabela 3.1. Siłowe diagnostyczne cechy parametrów stanu

Zmienne parametry stanu	Cechy diagnostyczne*				
	F_x	F_y	F_z	A_R	f_R
Zużycie narzędzia na powierzchni przyłożenia	+	++	++	++	
Zużycie narzędzia na powierzchni natarcia	++	+	+		
Wykruszenie krawędzi skrawającej	++	++	++		
Zmiana kształtu wióra		+	+	++	+
Powstawanie narostu	+				

* Intensywność wpływu: + mała, ++ duża.

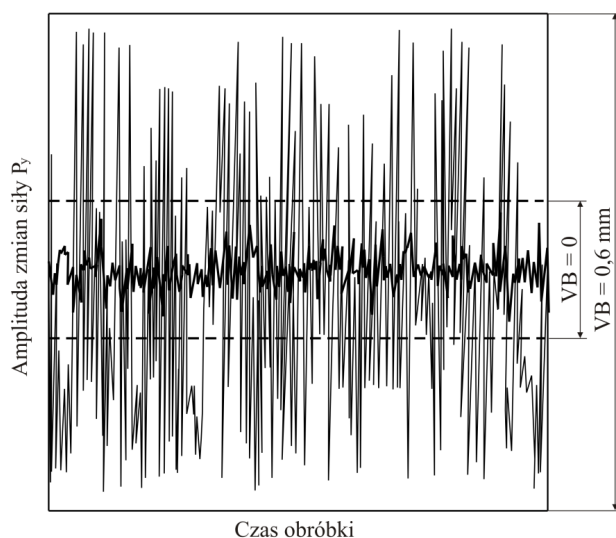
to zilustrować następującymi przykładami. Z przedstawionej tab. 3.1 wynika, że składowe siły skrawania F_x , F_y , F_z są informacyjnymi diagnostycznymi cechami rozwoju miejsca z użycia narzędzia na powierzchni przyłożenia, co potwierdzają eksperymentalnie określone zależności przedstawione na rys. 3.1. Wykresy zależności $F_x = f(VB)$ i $F_z = f(VB)$ (rys. 3.1) otrzymano podczas toczenia z prędkością skrawania $v_c = 102$ m/min. Przy braku narostu na ostrzu zaobserwowano dostatecznie wysoką informacyjność składowych siły F_x i F_z . Jeśli obniży się prędkość skrawania, to przy pozostałych niezmiennych warunkach skrawania informacyjność składowych F_x i F_z zdecydowanie się obniży. Można to wyjaśnić tym, że przy mniejszych prędkościach skrawania powstają warunki sprzyjające powstawaniu narostu. Narost zmniejsza powierzchnię zużycia VB z powierzchnią skrawania obrabianej części, a w związku z tym wzrost składowych sił powodowanych zużyciem VB .



Rys. 3.1. Zmiana sił F_x , F_z wraz ze wzrostem zużycia VB : materiał obrabiany – stal molibdenowa, opracowano na podstawie [121]

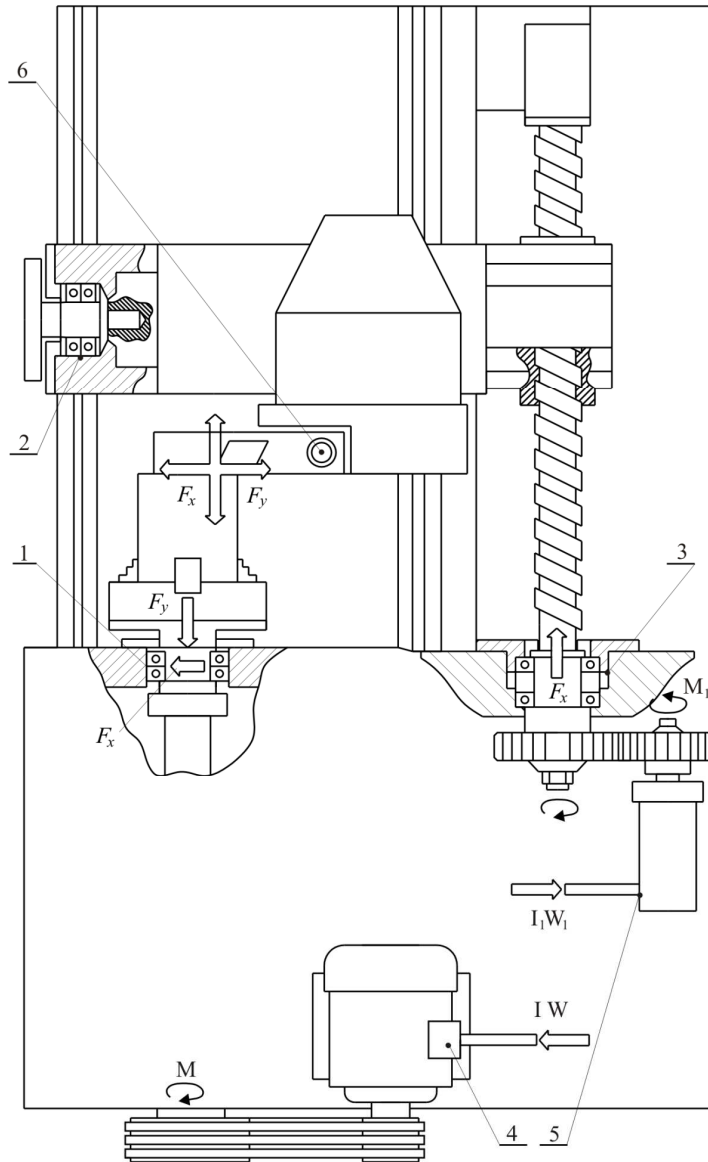
Wzrost powierzchni zużycia VB prowadzi do zwiększenia intensywności jej adhezyjnego wzajemnego oddziaływania z powierzchnią obrabianej części. Ponieważ cykliczne rozrywanie adhezyjnych szczepień powinno powodować drgania siły skrawania, wartość amplitudy drgań A_R może być wykorzystana jako diagnostyczna cecha zużycia VB . Potwierdza to zarejestrowana podczas doświadczeń przy obróbce stali X6CrNiTi-18-10 różnica w amplitudzie drgań w trakcie skrawania ostrym i zużytym na powierzchni przyłożenia narzędziem. Z analizy danych przedstawionych na rys. 3.2 wynika, że zwiększenie amplitudy zmian siły P_y następuje wraz ze wzrostem VB . Informacyjność A_R jednak się zmniejsza, jeśli przy pozostałych jednakowych warunkach będzie się zmieniać obrabiany materiał, np. stal 41Cr4.

Można podać wiele innych przykładów, gdy warunki skrawania zmieniają informacyjność diagnostycznej cechy w związku ze zmianą specyfiki wzajemnego oddziaływania między określonymi parametrem stanu a innymi parametrami będącymi ich diagnostycznymi cechami. Możliwe jest więc wykorzystanie parametrów siły skrawania jako diagnostycznej cechy stanu procesu i narzędzia. W przypadku oceny informacyjności siły skrawania badania eksperymentalne są zwykle prowadzone na specjalistycznych stanowiskach za pomocą laboratoryjnych dynamometrów, które pozwalają mierzyć składowe siły skrawania działające na narzędzia albo na obrabianą część zamocowaną w dynamometrze. Jednakże przyrządy te nie mogą być stosowane w warunkach produkcyjnych dla systemów operacyjnej diagnostyki na obrabiarkach NC z powodu konstrukcyjnych i eksploatacyjnych ograniczeń. W związku z tym w ostatnim czasie opracowano czujniki specjalne wbudowane w węzły i części obrabiarek.



Rys. 3.2. Zmiana amplitudy drgań siły w zależności od zużycia, opracowano na podstawie [121]

Informacyjność mierzonego parametru w dużej mierze zależy od miejsca zamocowania na obrabiarce czujnika przetwarzającego wartość parametrów siły w analogowe sygnały elektryczne. Znalezienie optymalnego wariantu wymaga specjalnych badań, które są konieczne do przeprowadzenia podczas budowy systemów diagnozowania. Na rysunku 3.3 przedstawiono schemat sił działających



Rys. 3.3. Schemat sił działających na węzły i części tokarki: 1 – tensometryczne łożyska; 2, 3 – łożyska śrub pociągowych; 4, 5 – czujniki mocy napędów; 6 – czujnik wibroakustyczny, opracowano na podstawie [121]

cych na węzły i części tokarki, pozwalający wyznaczyć miejsca zamocowania czujników siły. Podobne schematy opracowuje się dla innych obrabiarek. Na rysunku widać, że wartość powstającej w strefie skrawania siły może być określona za pomocą czujników wbudowanych w głowicę narzędziową obrabiarki. Składowa siła F_z odpowiada za opór skrawania i określa moc napędu ruchu głównego. Czujniki zabudowane w węzłach i elementach napędu dają sygnał proporcjonalny do siły F_z . Proporcjonalnie do zmiany siły F_z będzie się zmieniać moc silnika elektrycznego i natężenie pobieranego prądu. Składowe siły F_x i F_y sterują mechanizmem posuwu. Czujniki zabudowane w węzłach napędu posuwu dają sygnał proporcjonalny do F_y i F_x . Takie czujniki zabudowuje się na przykład w węzłach oporowych śrub posuwu wzdłużnego i poprzecznego. Pomiar mocy napędu posuwu pozwala także kontrolować zmianę tych sił. Siły te są także przenoszone przez promieniowe i oporowe łożyska wrzeciona. Do ich pomiarów stosuje się specjalne dynamometryczne łożyska. W dalszej części przedstawiono konstrukcje urządzeń stosowanych do pomiaru sił skrawania.

Do podstawowych metod pomiaru sił skrawania można zaliczyć:

- pomiar momentu skrawania,
- pomiar odkształceń sprężystych,
- pomiar odkształceń plastycznych,
- pomiar zapotrzebowania mocy.

Wyróżnia się następujące czujniki pomiarowe stosowane w pomiarach sił skrawania:

- parametryczne
 - fotoelektryczne,
 - indukcyjne,
 - magnetosprężne,
 - pneumatyczne,
 - pojemnościowe,
 - tensometryczne,
- generacyjne
 - elektrodynamiczne,
 - elektromagnetyczne,
 - hydrauliczne,
 - mechaniczne,
 - piezoelektryczne,
 - termoelektryczne.

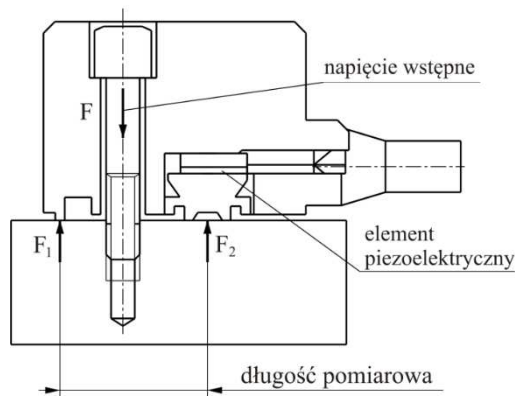
W dalszej części opracowania omówiono podstawowe metody pomiaru wartości sił skrawania.

3.2.2. Czujniki odkształceń i przemieszczeń

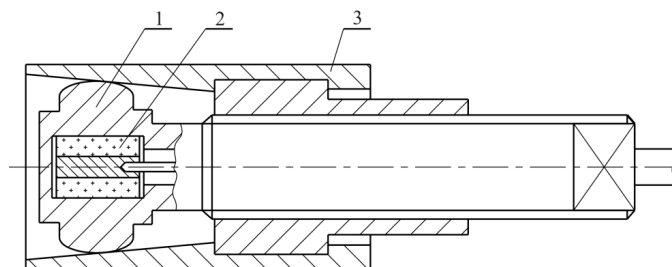
Zaletą czujników odkształceń i przemieszczeń korpusu jest bezpośredni pomiar wartości sił [58, 60]. Kwarcowe przetworniki odkształceń powierzchni (rys. 3.4) są mocowane na odpowiednio obciążonym elemencie obrabiarki.

Miejsce mocowania jest określone metodą prób i błędów, i powinno być tak dobrane, aby obciążenia było zależne od siły skrawania.

Czujniki piezoelektryczne są instalowane w formie podkładki pod łeb śruby mocującej imak tokarski. Ponieważ czujnik mierzy niewielkie zmiany naprężenia w śrubie wywołane obciążeniem, śruba musi być umieszczona na torze przenoszenia siły skrawania [58].



Rys. 3.4. Powierzchniowy czujnik odkształceń elementów obrabiarki, opracowano na podstawie [58]



Rys. 3.5. Budowa czujnika odkształceń poprzecznych: 1 – czujnik siły, 2 – element kwarcowy, 3 – tulejka mocująca, opracowano na podstawie [58]

Do wykrywania katastroficznego zużycia ostrza podczas obróbki zgrubnej są stosowane kołki pomiarowe (rys. 3.5), mocowane w otworach o średnicy 5-10 mm, mierzące quasi-statyczne i dynamiczne odkształcenia elementów obrabiarki [11]. Ze względu na większą długość pomiarową czujniki osiowe wytwarzają silniejszy sygnał niż czujniki promieniowe [2, 58].

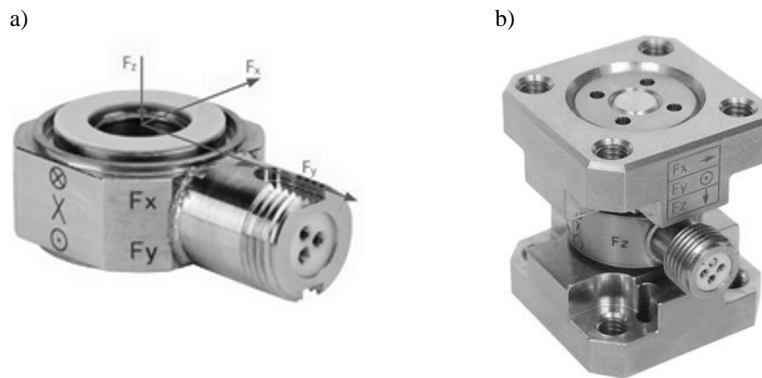
3.2.3. Czujniki pomiarowe siły

Czujniki siły (rys. 3.6) są budowane w postaci przetworników jedno-, dwu- lub trzyskładowych [58]. Montaż czujników powinien zapewniać przenoszenie niewielkiej części obciążenia (do 10%), dzięki czemu sztywność czujnika jest około 10-krotnie większa niż w siłomierzach laboratoryjnych. Zaletą takiego

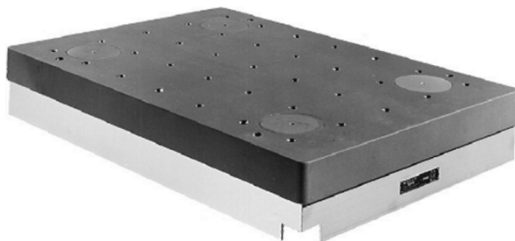
rozwiązania jest również zabezpieczenie czujnika przed przeciążeniem. Zaleca się stosować następujące konfiguracje montażu [58]:

- płyta pomiarowa (rys. 3.7) zawierająca jeden lub dwa przetworniki, stanowiąca podkładkę mocowaną między obciążonymi elementami obrabiarki, płyta musi być instalowana na drodze przenoszenia siły, tj. między głowicą rewolwerową a suportem poprzecznym lub między sprzęgłem Hirtha a głowicą,
- wnąki (rys. 3.8a) na połączeniu śrubowym, w których jest instalowany czujnik; grubość podkładki dobiera się tak, aby uzyskać odpowiednie obciążenie wstępne,
- nastawny klin z wnąką (rys. 3.8b), podobnie jak w rozwiązaniu poprzednim, ale zamiast podkładki stosuje się nastawny klin; możliwy jest również montaż czujnika bezpośrednio na obrabiarce zamiast na połączeniu.

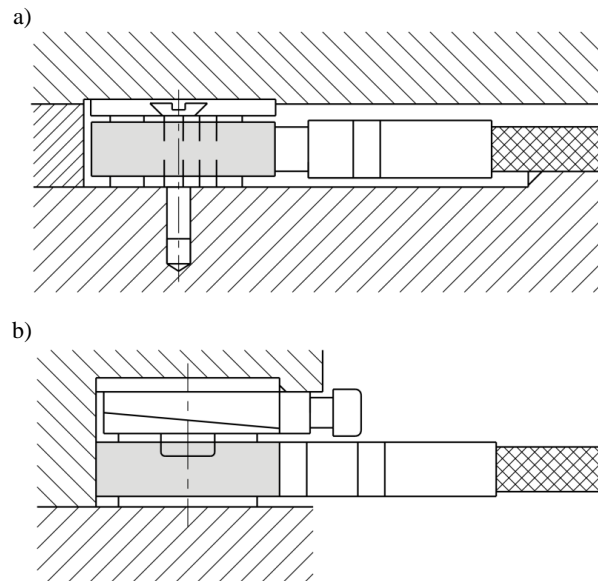
Najdokładniejszy pomiar sił skrawania zapewniają płyty pomiarowe, ich wadą jest jednak trudność montażu. Wiodącym producentem przetworników siły jest firma Kistler, której wyroby są stosowane również przez innych producentów oprzyrządowania pomiarowego. Czujniki siły są często zintegrowane ze wzmacniaczem, który poprawia jakość sygnału i użyteczność ładunku [74, 92].



Rys. 3.6. Czujnik pomiarowy sił skrawania Kistler 9017C (a) wraz z elementami mocującymi (b), opracowano na podstawie [91]



Rys. 3.7. Płyta pomiarowa 9253B11 firmy Kistler, opracowano na podstawie [91]



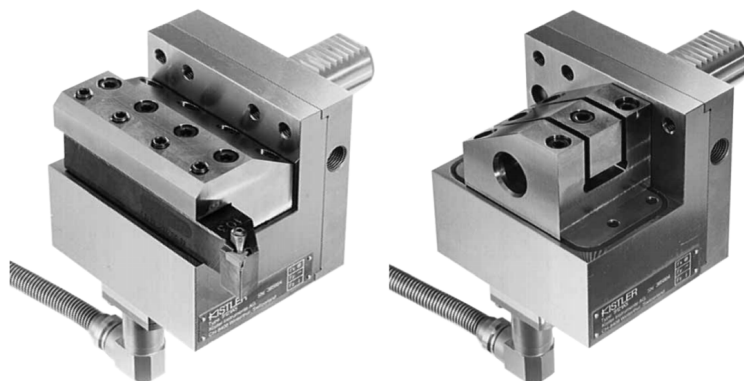
Rys. 3.8. Sposób pomiaru sił skrawania za pomocą wnelki (a) oraz nastawnego klina (b), opracowano na podstawie [58]

Czujniki piezoelektryczne w formie płytek mocowanych między elementem obciążonym siłami, np. głowicą rewolwerową a górną powierzchnią suportu poprzecznego, wprowadzają najmniejsze zmiany sztywności statycznej i dynamicznej obrabiarki. Element w postaci płytki zajmuje niewielką część powierzchni styku łączonych elementów, często jest wbudowany w strukturę oprawki nożowej (rys. 3.9). Czujniki piezoelektryczne wbudowane w oprawkę narzędziową (rys. 3.10) ustalaną i mocowaną we wrzecionie obrabiarki mierzą wartości trzech składowych siły skrawania oraz moment obrotowy na wrzecionie. Jedna z części czujnika – stała jest mocowana do obudowy wrzeciona, natomiast druga – ruchoma w gnieździe wrzeciona obrabiarki.

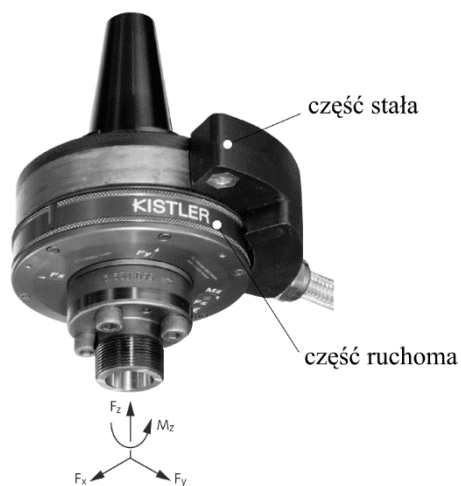
Do budowy przetworników piezokwarcowych siły wykorzystuje się głównie podłużne zjawisko piezoelektryczne [84]. Płytki kwarcowe są wykonywane w postaci walców, których wysokość jest mniejsza od średnicy, przy czym osią walca jest oś $x-x$ kryształu kwarcu. Korzystając ze zjawiska podłużnego, aby zwiększyć ładunek, buduje się stosy płytek nakładanych jedna na drugą i połączonych ze sobą równolegle [84]. Sumuje się wszystkie pojawiające się ładunki dodatnie i ujemne, co pozwala na zwiększenie czułości przetwornika. Wartość ładunków powstających na powierzchniach prostopadłych do osi $x-x$ pod wpływem działania siły skierowanej wzdłuż osi elektrycznej ($x-x$) nie zależy od wymiarów geometrycznych płytki:

$$Q = k_m \cdot F_x \text{ [C]} \quad (3.1)$$

gdzie: Q – ładunek na powierzchni prostopadłej do osi elektrycznej,
 k_m – moduł piezoelektryczny [C/N],
 F_x – siła zgodna z kierunkiem osi elektrycznej (x - x) [N].



Rys. 3.9. Odmiiany siłomierzy tokarskich Kistler 9121, opracowano na podstawie [91]

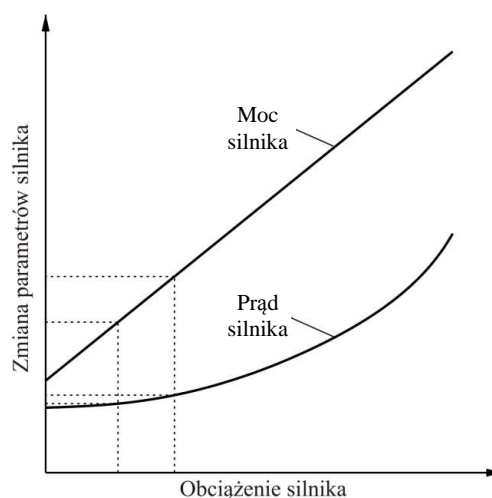


Rys. 3.10. Czujnik pomiarowy składowych F_x , F_y , F_z siły skrawania i momentu obrotowego M_z Kistler 9123C, opracowano na podstawie [91]

Do monitorowania on-line procesów obróbki można również zastosować dwa piezoelektryczne pierścieniowe czujniki sił, zintegrowane z wrzecionem napędzanym bezpośrednio silnikiem [11]. Vilcek i Madl [141] zastosowali analizę sygnału siły do monitorowania stanu narzędzia przy wierceniu. Omówili również metodę przewidywania uszkodzeń za pomocą analizy cepstralnej oraz funkcji koherencji dla siły oporu i sygnałów momentu obrotowego. Stwierdzili możliwość przewidywania katastroficznego uszkodzenia na podstawie oznak zużycia narzędzia, powodującego jego silne drgania skrętne.

3.2.4. Czujniki mocy wykorzystywane przez napędy obrabiarek

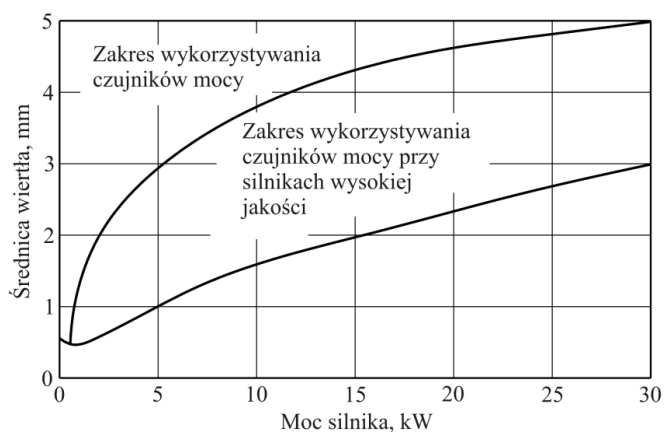
Czujniki mocy służą do określania mocy silnika głównego lub posuwowego na podstawie bezpośredniego pomiaru napięcia i natężenia. W instalacjach obrabiarek natężenie prądu jest mierzone za pomocą od jednego do trzech czujników Halla [107, 108]. Zastosowanie trzech czujników eliminuje błędy przesunięcia fazowego. Przewaga pomiaru mocy nad pomiarem wyłącznie natężenia prądu wynika z zależności między mocą i obciążeniem silnika. Moc jest liniową funkcją obciążenia silnika, natomiast natężenie prądu zmienia się nieznacznie przy małym obciążeniu (rys. 3.11) [108]. Według danych firmy Nordmann Sensor Technology nieznaczne zakłócenia sygnału z czujnika mocy, np. fale, składowe o wysokiej częstotliwości, krótkotrwałe zaniki sygnału, mogą być wygładzone [101].



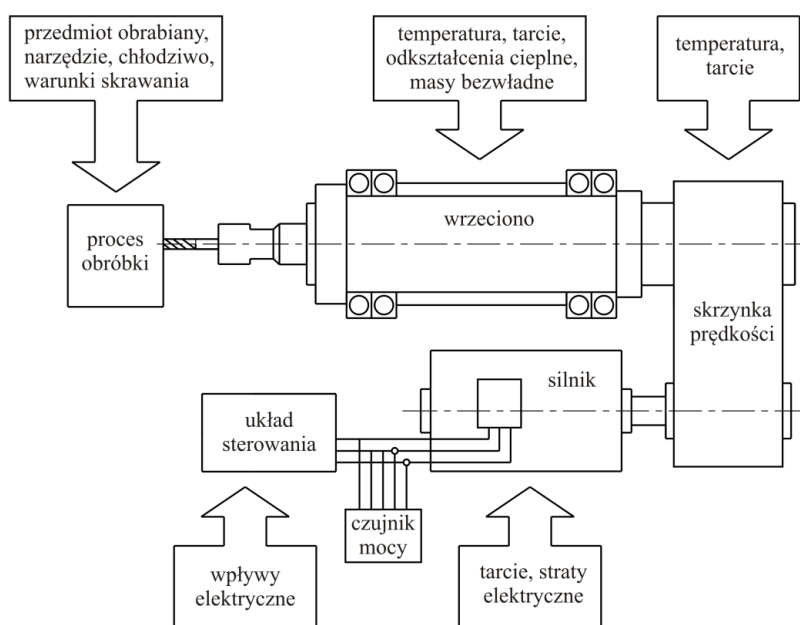
Rys. 3.11. Wpływ obciążenia silnika na moc i natężenie prądu, opracowano na podstawie [108]

Dokładność pomiaru mocy skrawania za pomocą omówionych czujników zależy od stosunku mocy skrawania do mocy nominalnej silnika. W związku z tym małe narzędzia, które są napędzane indywidualnie przez silniki o stosunkowo dużej mocy, mogą być monitorowane tylko przy wysokiej jakości silników [58, 101]. Przykładem może być wpływ średnicy wiertła i mocy silnika na zakres stosowania czujników mocy (rys. 3.12) podczas wiercenia w stali z precyzyjnymi parametrami skrawania.

Jakość sygnału z czujnika mocy zależy nie tylko od parametrów skrawania, lecz również od wielu zjawisk i zakłóceń występujących podczas obróbki (rys. 3.13). Pomiar mocy obrabiarki jest wykorzystywany do oceny zużycia narzędzia lub do wykrywania jego braku [108]. Bezwładność układu napędowego obrabiarki, działająca na sygnał z czujnika jak filtr dolnoprzepustowy, sprawia, że katastroficzne zużycie ostrza jest wykrywane z opóźnieniem [60].



Rys. 3.12. Zakres stosowania czujników mocy, opracowano na podstawie [58]



Rys. 3.13. Zakłócenia wpływające na pracę czujnika mocy, opracowano na podstawie [71]

Metoda określania siły skrawania za pomocą pomiaru zapotrzebowania mocy polega na pomiarze mocy pobieranej z sieci przez obrabiarkę na biegu jałowym i pod obciążeniem w czasie skrawania. W przypadku napędu obrabiarki asynchronicznym silnikiem prądu zmiennego pomiar mocy musi być dokonany jednocześnie w trzech fazach.

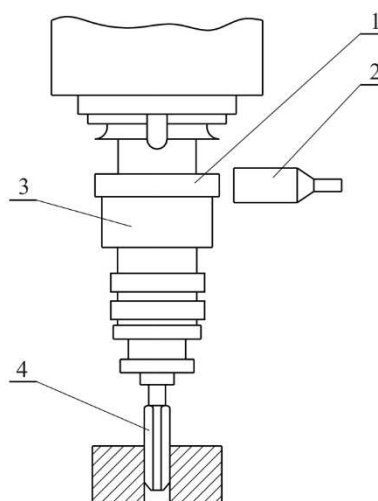
Siłę skrawania oblicza się z zależności:

$$F_s = \frac{N_s \cdot \eta_s \cdot \eta_o}{v_c} \quad [\text{N}] \quad (3.2)$$

gdzie: N_s – moc silnika [kW],
 η_s – współczynnik sprawności silnika,
 η_o – współczynnik sprawności obrabiarki,
 v_c – prędkość skrawania [m/min].

3.2.5. Czujniki momentu skręcającego

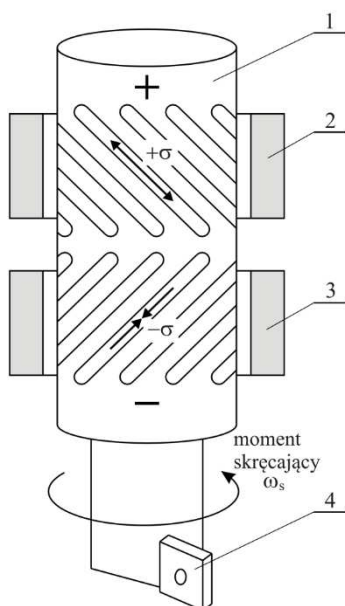
Czujniki momentu skręcającego mogą być stosowane m.in. do monitorowania zużycia ostrza, wykrywania zużycia katastroficznego, błędów głębokości gwintowania oraz za małej lub zbyt dużej średnicy gwintowanego otworu. Typowy tensometryczny czujnik momentu skręcającego zintegrowany z oprawką narzędziową składa się z rotora i statora zamocowanego na stałe na korpusie obrabiarki [58]. Stator służy do zasilania i odbioru sygnału. Rotor otaczający górną część oprawki lub uchwytu narzędziowego zawiera mostek tensometryczny z układem odbierającym sygnał pomiarowy z tensometrów (rys. 3.14). Integracja czujnika momentu skręcającego w oprawce narzędziowej sprawdza się doskonale podczas monitorowania gwintowników i wiertel [59, 60] oraz na obrabiarkach wielwrzecionowych, gdzie tylko część mocy jest wykorzystywana przez jedno wrzeciono [100].



Rys. 3.14. Oprawka do gwintowania z czujnikiem parametrów siłowych: 1 – rotor, 2 – stator, 3 – oprawka, 4 – narzędzie, opracowano na podstawie [58]

Magnetoelastyczne mierniki momentu skręcającego są zbudowane z pierścienia o właściwościach magnetycznych, zintegrowanego z obracającą się tuleją wrzecioną oraz nieruchomego układu zasilająco-odbiorczego (rys. 3.15)

[103]. W pierścieniu sygnał mechaniczny jest zamieniany na proporcjonalne pole magnetyczne. Zadaniem układu odbiorczego jest natomiast konwersja sygnały magnetycznego na sygnał elektryczny. W innym rozwiązaniu wykorzystano zależność przewodności elektrycznej ferromagnetyków od stanu naprężeń [137].



Rys. 3.15. Magnetostrykcyjny czujnik momentu obrotowego: 1 – uchwyt, 2, 3 – cewki, 4 – ostrze, opracowano na podstawie [58]

3.3. Drgania podczas procesu skrawania jako diagnostyczne cechy stanu procesu i narzędzia

3.3.1. Akustyczno-emisyjne metody diagnozowania zużycia narzędzia

Podczas skrawania powstają drgania o różnej częstotliwości, amplitudzie i intensywności. Mają one wpływ na proces tworzenia wióra, jakość obrabianej części i efektywność pracy narzędzia [70, 82]. Przy określonych warunkach skrawania i wartościach amplitudowo-częstotliwościowych charakterystyk powstawanie drgań jest efektem pozytywnym podczas obróbki skrawaniem, ponieważ ułatwiają one deformację plastyczną materiału obrabianego. W innych przedziałach tych charakterystyk drgania mogą doprowadzić do zmęzeniowych wykruszeń ostrza skrawającego, intensywnego zużycia narzędzia, a niekiedy również do jego zniszczenia. Gdy rozpatruje się drgania narzędzia w procesie skrawania, zwykle ma się na uwadze tylko drgania na dominującej częstotliwości drgań własnych. W rzeczywistości spektrum drgań jest ciągłe.

Drgania o określonej intensywności będą mieć miejsce na dowolnej częstotliwości. Zmienna dynamiczna składowa siły skrawania, oddziałując na konstrukcję obrabiarki, narzędzia oraz przedmiotu obrabianego, wywołuje niepożądane drgania wpływające szkodliwie na efekty obróbki. Drgania te można podzielić na trzy kategorie [148]:

- swobodne,
- wymuszone,
- samowzbudne.

Drgania wymuszone to drgania spowodowane zewnętrznymi okresowymi wymuszeniami. Częstotliwość wymuszonych drgań określa częstotliwość wymuszającej siły. Ich amplituda silnie wzrasta, gdy częstotliwość siły wymuszającej jest bliska częstotliwości drgań własnych elementów systemu technologicznego. W systemie technologicznym obróbki skrawaniem powstają również drgania samowzbudne. To takie drgania, które są spowodowane i podtrzymywane cyklicznie działającym wymuszeniem powstającym w procesie skrawania i sterowanymi tym procesem. W procesie obróbki skrawaniem mogą się pojawić drgania o wysokim poziomie, które negatywnie wpływają na właściwości przedmiotu obrabianego. Szczególnie niepożądane są drgania samowzbudne typu *chatter* [148], które mogą spowodować nadmierny wzrost sił działających na przedmiot obrabiany i narzędzie skrawające. Przyczyną występowania drgań samowzbudnych typu *chatter* jest oddziaływanie między siłami skrawania a częstotliwościami drgań własnych narzędzia oraz przedmiotu obrabianego [148]. Zjawiskiem determinującym powstanie tego typu drgań jest efekt regeneracji śladu oraz sprzężenie wewnętrzne w układzie obrabiarka – uchwyt – przedmiot obrabiany – narzędzie (OUPN) [148].

Drgania są wykorzystywane do diagnozowania stanu procesu skrawania i narzędzia [25, 34]. Diagnostyka jest oparta na pomiarze parametrów drgań elementów sprężystego systemu obrabiarki w szerokim zakresie częstotliwości. Drgania można podzielić na trzy zakresy częstotliwości:

- niskiej do 1 kHz
- średniej 1÷80 kHz,
- wysokiej 80÷100 kHz.

Lipski [84] zwraca uwagę, że praktyczne zastosowanie ma częstotliwość sygnału akustycznego w przedziale od 100 kHz do 1 MHz. Z kolei według Bluma i innych [6] odpowiednim przedziałem w ocenie relacji między warunkami skrawania a zmianami w widmie sygnału emisji akustycznej jest zakres 100÷300 kHz.

Drgania o średniej częstotliwości przeważnie nazywa się wibroakustycznymi (WA), a wysokiej częstotliwości – emisją akustyczną (EA). Emisja akustyczna jest definiowana jako fala wygenerowana przez szybkie uwolnienie energii ze zlokalizowanego źródła albo źródeł w materiale poddanym wytężeniu [112].

Źródłem powstawania drgań o niskiej częstotliwości systemu technologicznego są różne okresowe procesy:

- bicie obracających się ciał (wrzecion, kół zębatach itp.),
- przerywany proces skrawania (np. podczas frezowania),
- cykliczność powstawania wióra i narostu.

W obrębie strefy skrawania źródłami emisji akustycznej podczas obróbki skrawaniem są [82]:

- odkształcenia plastyczne zachodzące w materiale obrabianym podczas procesu skrawania,
- odkształcenia plastyczne wióra,
- tarcie między powierzchnią przyłożenia narzędzia a przedmiotem obrabianym,
- tarcie między powierzchnią natarcia narzędzia i wiórem,
- kolizja między wiórem i narzędziem,
- łamanie wióra,
- wykruszenie ostrza narzędzia.

W związku z tym niskoczęstotliwościowe drgania niosą informację o dynamice wzajemnego oddziaływania technologicznego oprzyrządowania i niektórych specyfik procesy skrawania. Źródłem powstawania wibroakustycznych drgań średnio częstotliwościowych są także:

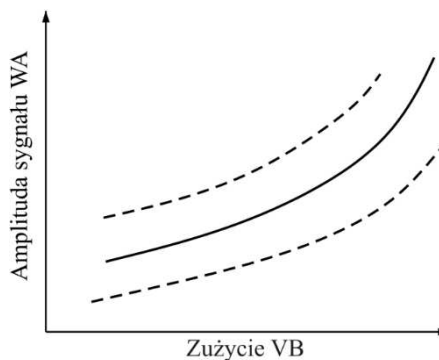
- okresowość powstawania elementów wióra,
- złożone procesy wzajemnego oddziaływania narzędzia z materiałem obrabianym.

Wiadomo, że skrawanie to proces sprężysto-plastycznych deformacji obrabianego metalu. Towarzyszy mu proces tarcia na powierzchni styku narzędzia z materiałem obrabianym oraz plastyczne i kruche niszczenie materiału narzędzia. Każdy z tych procesów jest źródłem wibroakustycznych fal o określonej częstotliwości i amplitudzie. Procesy powodujące powstanie fal wibroakustycznych zależą od wielu różnych czynników [58, 59]:

- fizykomechanicznych właściwości materiału obrabianego,
- mikro- i makrogeometrii narzędzia,
- dynamicznych charakterystyk sprężysto-technologicznego systemu,
- parametrów skrawania itp.

Zużycie narzędzia powoduje zwiększenie częstotliwości sygnału wibroakustycznego. Charakter plastycznej deformacji materiału obrabianego podczas tworzenia się wióra i deformacja warstwy wierzchniej obrabianej części są zdefiniowane warunkami obróbki. Warunki powstawania wióra i prędkość spływu wióra na powierzchni natarcia, procesy styku i właściwości materiału narzędzia podlegają ciągłej zmianie. W związku z losowym charakterem wpływu wszystkich tych procesów i czynników na drgania wibroakustyczne oraz z losowym charakterem zużycia parametry sygnału wibroakustycznego są korelacyjnie związane ze stanem narzędzia skrawającego. Typową zależność amplitudy sy-

gnału WA od zużycia narzędzia na powierzchni przyłożenia przedstawiono na rys. 3.16. Linia ciągła na rys. 3.16 przedstawia zmianę wartości oczekiwanej amplitudy drgań, a linie przerywane określają granice rozrzutu. Znaczący wzrost wartości oczekiwanej po osiągnięciu określonej wartości zużycia pozwala wykorzystać sygnał wibroakustyczny do diagnozowania stanu narzędzia. Źródłem wysokoczęstotliwościowych drgań ze strefy skrawania są procesy związane z tarcieniem, zniszczeniem oraz deformacjami plastycznymi. Drgania powstają w wyniku oddziaływania nierówności powierzchni styku, rozrywania adhezyjnych szczepień, powstawania mikro- oraz makropęknięć, ruchu dyslokacji.



Rys. 3.16. Wpływ wartości zużycia VB na amplitudę sygnału WA , opracowano na podstawie [121]

Wszystkie przedstawione procesy razem odzwierciedlają stałą składową sygnału EA . Zmiany w charakterze przebiegu procesów wywołują zmiany parametrów sygnału akustycznego. Powstaje zmienna składowa sygnału EA . Przyczyną tego może być naruszenie powstawania i spływu wióra oraz zwiększenie powierzchni styku na powierzchniach roboczych narzędzia [54, 122]. Wyodrębnienie z ogólnego poziomu sygnałów EA zmiennej w czasie składowej pozwala na diagnozowanie stanu procesów skrawania i narzędzia. Funkcjonalny związek między zużyciem narzędzia i amplitudą sygnału EA teoretycznie określa się ze wzoru:

$$mA = mA_0 + k \cdot VB \text{ [mm]} \quad (3.3)$$

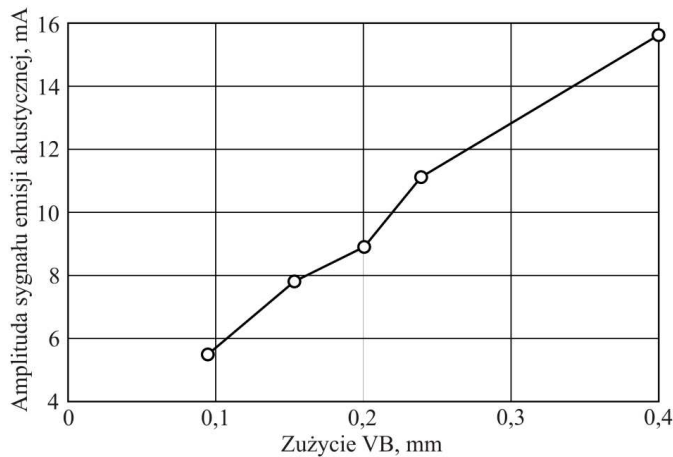
gdzie: mA – wartość oczekiwana amplitudy sygnału EA przy zużyciu na powierzchni przyłożenia VB [mm],

mA_0 – wartość oczekiwana amplitudy sygnału EA przy braku zużycia [mm],

k – współczynnik uwzględniający informacyjność diagnostycznej cechy.

Na rysunku 3.17 przedstawiono zależność amplitudy sygnału EA od zużycia powierzchni przyłożenia VB uzyskaną podczas toczenia stali 30XGHZA (HRC 50÷52) nożem z węgla spiekanego. Charakter tej zależności jest bliski

liniowemu, co potwierdza przedstawiona teoretyczna zależność, i ilustruje wysoką informacyjność sygnału *EA* podczas diagnozowania zużycia narzędzia.



Rys. 3.17. Wpływ wartości zużycia *VB* na amplitudę sygnału emisji akustycznej, opracowano na podstawie [121]

Badania Jemielniaka [58] oraz Jemielniaka i Otmana [64] wykazały istnienie korelacji między wartością skuteczną sygnału emisji akustycznej a bieżącym stanem zużycia ostrza narzędzia. Zależy ona także od parametrów skrawania.

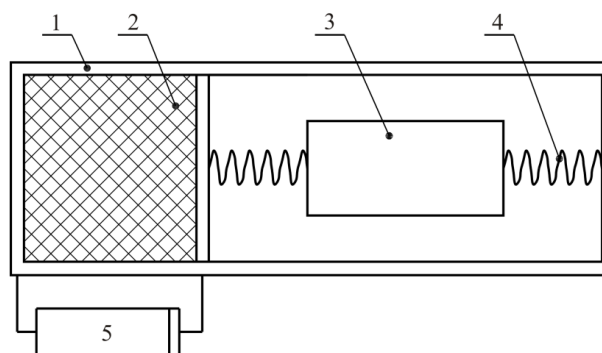
Naturalnymi zakłóceniami sygnału emisji akustycznej, które mogą ograniczać stosowanie *EA* w systemach diagnostycznych zużycia narzędzia, są oddziaływanie innych maszyn i napędów własnych obrabiarki [18]. Yao i inni [152] uważają, że nie jest możliwe wyeliminowanie wszystkich zakłóceń sygnału emisji akustycznej. Niezbędne jest więc opracowanie optymalnych procedur filtracyjnych dostosowanych do określonego typu i warunków obróbki [62]. Chen i Li [17] opracowali metodę wykrywania punktów osobliwych sygnału *EA* (np. pików, punktów nieciągłości) opartą na maksymalnej wartości modułu transformaty falkowej.

Podstawową zaletą akustyczno-emisyjnej metody diagnozowania jest słaba zależność parametrów sygnałów diagnostycznych od dynamicznych charakterystyk obrabiarek. Zakumulowany poziom częstotliwości drgań, które niosą informację ze strefy skrawania, znacznie przewyższa częstotliwość drgań ze strefy skrawania obrabiarek. Wadą tej metody jest znaczne osłabienie sygnału po jego przejściu przez sprężysty system obrabiarki, dlatego sygnał powinien być zarejestrowany bezpośrednio z narzędzia. Niestety ustawienie czujnika w pobliżu strefy skrawania nie zawsze jest możliwe (np. na obrabiarkach z automatyczną wymianą narzędzi). Z przedstawionych rozważań wynika, że każdy z uwzględnionych zakresów częstotliwości posiada dominującą informację właśnie o tych procesach obróbki skrawaniem, które po swojej dynamice odpowiadają wybra-

nej przy pomiarze częstotliwości. Parametry drgań w każdym zakresie częstotliwości mogą być przyjmowane jako informacyjne cechy odpowiednich procesów [99, 111].

3.3.2. Czujniki drgań – akcelerometry

Drgania powstające podczas obróbki skrawaniem rejestruje się za pomocą czujników wykorzystujących efekt piezoelektryczny. Czujnik przetwarza sygnał elektryczny przyspieszenia drgań ruchu narzędzia albo tej części obrabiarki, na której jest zamocowany. Zasadniczy schemat przykładowego czujnika przedstawiono na rys. 3.18. W korpusie czujnika (1) zamocowano element piezoelektryczny (2). Na sprężynach (4) zawieszono obciążnik (3) o masie m . Jeśli korpus będzie zamocowany na drgającym obiekcie, np. oprawce narzędzia, to przy przemieszczeniu korpusu razem z oprawką narzędzia w drgającym ruchu obciążnik (3) będzie oddziaływać na piezoelement (2) przez sprężynę (4) z siłą bezwładności F_B .



Rys. 3.18. Zasada działania piezoelektrycznego czujnika akcelerometru: 1 – korpus czujnika, 2 – element piezoelektryczny, 3 – obciążnik, 4 – sprężyna, 5 – zespół pomiarowy

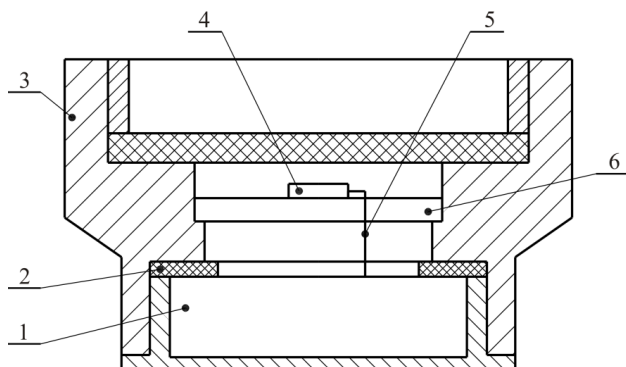
Piezoelement będzie odkształcany siłą wynikającą z zależności:

$$F = -m \cdot a \text{ [N]} \quad (3.4)$$

gdzie: m – masa obciążnika [kg],
 a – przyspieszenie układu [m/s^2].

Znak „-” wskazuje, że wektor siły jest skierowany przeciwnie do przyspieszenia. Wartość potencjału elektrycznego na krawędziach piezokryształu i wartość natężenia elektrycznego między leżącymi krawędziami jest proporcjonalna do przyspieszenia ruchów drgających, tj. drgania mechaniczne będą odwzorowane drganiami prądu elektrycznego. Zespół pomiarowy (5) rejestruje wartość sygnału elektrycznego. Typową konstrukcją piezoczuJNIKA emisji akustycznej przed-

stawiono na rys. 3.19. Piezoelement (1) ze sztucznej piezoceramiki polaryzowanej na grubości umieszczono na podkładce (2) izolującej go od korpusu (3) z tworzywa sztucznego. Do srebrzonej powierzchni ceramiki podpięto przewód (5), przez który napięcie elektryczne jest przekazywane na odbiornik prądu (4) zamocowany na tekstolitowej podkładce (6). Druga powierzchnia ceramiki jest połączona z korpusem.



Rys. 3.19. Czujnik piezoelektryczny emisji akustycznej: 1 – piezoelement, 2 – podkładka, 3 – korpus, 4 – odbiornik prądu, 5 – przewód, 6 – tekstolitowa podkładka

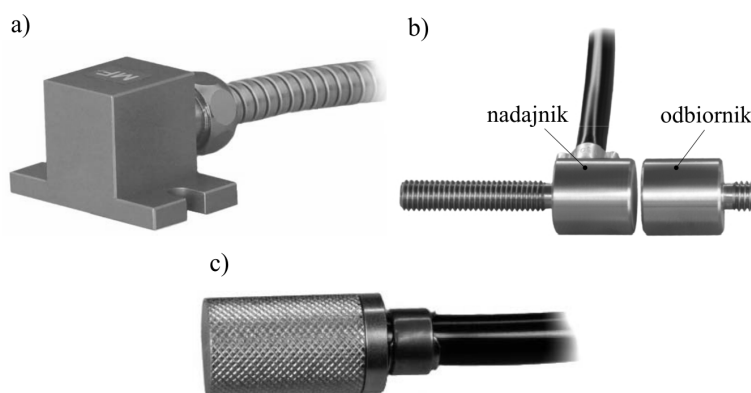
Podział czujników zależy od wartości odbieranych przez nie drgań [5]. Niemiecka firma NORDMAN, przyjmując jako kryterium sposób mocowania i przekazywania sygnału, dzieli czujniki emisji akustycznej na trzy podstawowe grupy [103, 133]:

- SEA (niem. *Schall-Emissions-Aufnehmer*) – czujnik emisji akustycznej o niskim poziomie szumów, przenoszący częstotliwości w paśmie od 0 Hz do 1 MHz (rys. 3.20a),
- RSA (niem. *Rotierenden Schall-Aufnehmer*) – obrotowy czujnik emisji akustycznej składający się z wirującego nadajnika oraz stacjonarnego odbiornika, oba umieszczone z boku narzędzia (rys. 3.20b),
- BSA (niem. *Berührungsloser Schall-Aufnehmer*) – indukcyjny bezkontaktowy czujnik emisji akustycznej stosowany w obróbkach z narzędziami obrotowymi (rys. 3.20c).

Aby uzyskać sygnał drgań, ważne jest prawidłowe określenie miejsca zamocowania czujnika. Większość przemysłowych czujników (rys. 3.21) stosowanych w diagnostyce narzędzia i procesu skrawania jest przeznaczona do odbioru sygnału *EA* z powierzchni obrabiarki.

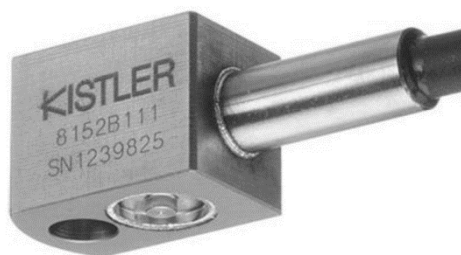
Trudności z odbiorem sygnału *EA* spowodowane zakłóceniami od innych narzędzi, np. na wielowrzecionowych centrach obróbkowych, pozwalają na wyeliminowanie czujnika wykorzystującego przenoszenie sygnału *EA* przez chłodziwo. Ciecz oprócz standardowych funkcji chłodząco-smarujących spełnia

także zadanie ośrodka rozchodzenia się fali akustycznej. Czujnik może być skierowany bezpośrednio na narzędzie lub przedmiot, umożliwiając odbiór fal naprężeń z materiałów o bardzo nierównej powierzchni oraz przedmiotów obracających się [58]. Sygnał może być zakłócony przez znajdujące się w chłodziwie pęcherzyki powietrza, co z kolei wymaga odpowiedniej filtracji sygnału *EA*.



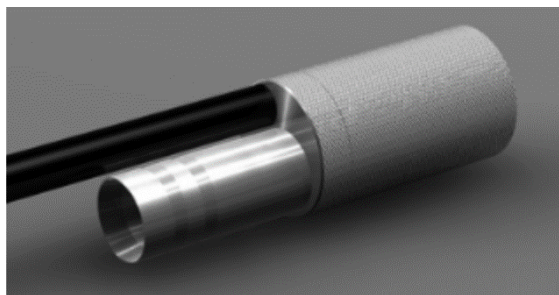
Rys. 3.20. Czujniki pomiaru emisji akustycznej: a) SEA, b) RSA, c) BSA, opracowano na podstawie [93]

Rys. 3.21. Typowy przemysłowy czujnik emisji akustycznej, opracowano na podstawie [91]



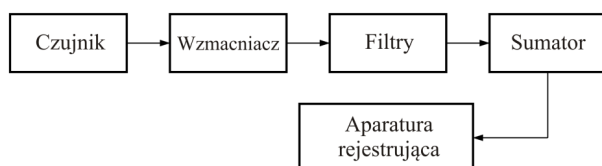
Innym rozwiązaniem problemu rejestracji sygnału *EA* z elementów obrotowych, np. wrzecion, jest zastosowanie czujnika hydroakustycznego typu SEH (niem. *Schall-Emissions-Hydrophon*) (rys. 3.22), składającego się z obrotowego przetwornika sygnału oraz odbiornika. Głównym przeznaczeniem tych czujników jest monitorowanie procesu zużycia narzędzi [133]. Do głównych zalet czujników typu SEH można zaliczyć [133]:

- możliwość ich zastosowania praktycznie do wszystkich typów obrabierek,
- znaczne zbliżenie się do strefy obróbki,
- brak licznych połączeń (ośrodków przenoszenia fali), które powodują zakłócenia, a przede wszystkim osłabienie sygnału,
- niezależność zastosowania od obrotowego lub liniowego charakteru ruchu przedmiotu obrabianego lub narzędzia podczas obróbki.



Rys. 3.22. Czujnik emisji akustycznej typu SEH, opracowano na podstawie [93]

Kryterium prawidłowego wyboru miejsca mocowania czujnika może stanowić największa różnica między poziomem sygnału w procesie skrawania i na biegu jałowym obrabiarki. Do przekształcenia i analizy sygnału elektrycznego odwzorowującego drgania może być zastosowana typowa aparatura, której schemat strukturalny przedstawiono na rys. 3.23. Sygnał elektryczny zawiera informację o drganiach (tak jak to przedstawiono wcześniej) w szerokim spektrum częstotliwości. Sygnał wzmacniony za pomocą wstępnego wzmacniacza jest przekazywany na filtr częstotliwości, w którym jest odfiltrowywany do dalszej analizy sygnał przyjętej oktawy częstotliwości w zależności od celu badań. Dalej sygnał jest przekazywany do integrującego wzmacniacza, gdzie wzmacnia się wybrany parametr sygnału.



Rys. 3.23. Zespół pomiarowy sygnału wibroakustycznego

W charakterze sygnałów pomiarowych można stosować prędkość v_x i przyspieszenie a_x przemieszczenia x_a w procesie drgań. W przypadku drgań harmonicznym te parametry są związane następującymi zależnościami:

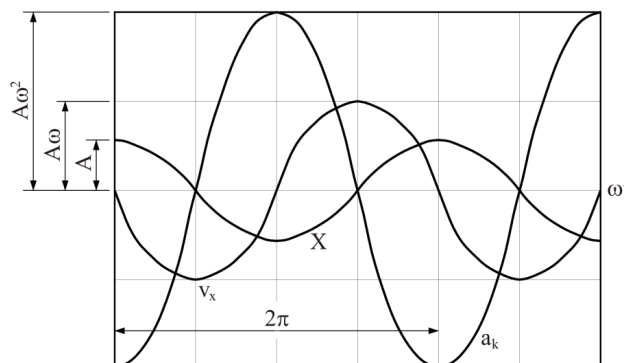
$$\begin{aligned}
 x_a &= A \cos(\omega t) \text{ [mm]} \\
 v_x &= \dot{x}_a(t) = -A\omega \sin(\omega t) = A\omega \cos(\omega t + \pi/2) \text{ [mm/s]} \\
 a_x &= \ddot{x}_a(t) = -A\omega^2 \cos(\omega t) = A\omega^2 \cos(\omega t + \pi) \text{ [mm/s}^2\text{]}
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

gdzie: ω – częstotliwość kątowa drgań [rad/s],

t – czas [s],

A – amplituda drgań [mm].

Zmianę parametrów drgań w czasie t dla przyjętej amplitudy A i częstotliwości ω drgań przedstawiono na rys. 3.24. Największą wartość sygnału uzyskuje się przy zmianie przyspieszenia, a najmniejszą podczas pomiaru przemieszczeń. W związku z tym parametr pomiaru należy wybierać w zależności od częstotliwości drgań.



Rys. 3.24. Zmiana sygnału parametrów drgań, opracowano na podstawie [121]

Rejestracja sygnału wibroakustycznego wymaga instalacji miniaturowych czujników przyspieszeń w pobliżu strefy skrawania. W obudowie tych czujników znajduje się bezwładnościowy czujnik przyspieszeń, wzmacniacz dopasowujący, filtr antyaliasingowy, przetwornik analogowo-cyfrowy oraz mikroprocesor sterujący wstępnym przetwarzaniem. Obudowa czujników jest odporna na uderzenia wiórów i cieczy chłodząco-smarujące.

Sposoby wykorzystania sygnału wibroakustycznego do diagnostyki narzędzia można podzielić na [13-15, 25, 84, 88]:

- systemy wykorzystujące wprost wartość średnią zmian amplitudy sygnału w czasie bez dodatkowej filtracji sygnału,
- rozwiązania, w których sygnał jest wstępnie filtrowany dodatkowymi filtrami analogowymi lub cyfrowymi,
- systemy przetwarzania wyznaczające różne parametry z zarejestrowanego sygnału, tj. wartość skuteczną, odchylenie standardowe, widmo amplitudowe oraz widmo mocy sygnału,
- systemy przekształcające sygnał wibroakustyczny do postaci widmowej oraz dokonujące na tak przekształconym sygnale operacji poprawiających skuteczność jego wykorzystania.

3.4. Parametry obrabianej części jako diagnostyczna cecha stanu narzędzia

3.4.1. Diagnostyka stanu narzędzia

We wcześniejszych analizach (rys. 1.3) omówiono związek między parametrami stanu obrabianej części i parametrami stanu narzędzia, a w tab. 1.2 wykazano, że parametry jednego z tych bloków mogą być diagnostycznymi cechami parametrów bloku drugiego. Ze wszystkich parametrów obrabianej części praktyczne zastosowanie jako diagnostyczne cechy stanu narzędzia mają przede wszystkim takie wskaźniki, jak wymiary części i chropowatość powierzchni elementu obrabianego. Związek między zużyciem narzędzia a wymiarami obrabianej części wynika z analizy struktury sumarycznego błędu obróbki:

$$\Delta = f(\Delta_H, \Delta_Y, \Delta_O, \Delta_{CT}, \Delta_N, \Delta_U) \quad (3.6)$$

gdzie: Δ_H – błędy spowodowane wymiarowym zużyciem narzędzia,
 Δ_Y – błędy spowodowane odkształceniami sprężystymi elementów systemu technologicznego wskutek zmiennej siły skrawania,
 Δ_O – błędy powstałe wskutek odkształceń cieplnych elementów systemu technologicznego,
 Δ_{CT} – błędy geometrycznej niedoskonałości obrabiarki,
 Δ_N – błędy nastawienia obrabiarki na wymiar obrabianej części,
 Δ_U – błędy ustawienia półwyrobu.

Pierwsze trzy składowe błędu obróbki Δ_H , Δ_Y i Δ_O są związane z zużyciem narzędzia. Składowa błędu Δ_H jest rezultatem zużycia narzędzia na powierzchni przyłożenia mierzonym bezpośrednio w kierunku kontrolowanego wymiaru obrabianej części. Wzrost Δ_Y jest efektem wzrostu siły skrawania związanej z zużyciem VB , które powoduje wzrost temperatury w strefie skrawania, prowadząc do zwiększenia Δ_O . Wystąpienie błędów Δ_Y i Δ_{CT} uniemożliwia ustalenie geometrycznie zdeterminowanej zależności między VB a sumarycznym błędem obrabiarki Δ , nawet przy stałych warunkach skrawania i innych składowych sumarycznych błędach obróbki. Ponieważ związek między nimi ma charakter stochastyczny, zależność $\Delta = f(VB)$ lub odpowiednio odwrotność tej zależności $VB = f(\Delta)$, przyjęto jako podstawę diagnozowania zużycia bądź wykruszenia ostrza.

W rezultacie kontroli wymiarów części za pomocą specjalnych przyrządów pomiarowych stwierdza się o zdatności albo o niezdatności narzędzia. Opierając się na zależności $VB = f(\Delta)$, przeprowadza się korektę nastawienia narzędzia na zadany wymiar obrabianej części. Korekta nastawienia narzędzia na zadany wymiar jest możliwa, ponieważ według kryterium technologicznego utrata zdolności skrawnej i wielkość dopuszczalnego zużycia narzędzia, którą podczas obróbki wykańczającej określa się tolerancją wymiaru części, jest często mniejsza niż wielkość opisująca początek katastroficznego zużycia. Po korekcie na-

stawienia narzędzie powinno wykazywać jeszcze dostatecznie duży zapas trwałości.

Korekty nastawienia mogą być realizowane, aż do osiągnięcia przez narzędzie dopuszczalnej wartości zużycia VB_{dop} . Konieczna jest zatem znajomość zależności $VB = f(\Delta)$, za pomocą której można określić aktualne wartości VB według wartości Δ i ocenić możliwości dalszej korekty nastawienia narzędzia. Wykorzystuje się do tego celu również ogólnie znane zależności między zużyciem narzędzia a chropowatością powierzchni obrabianej części i na tej podstawie ocenia się stan narzędzia.

Do pomiaru stanu w grupie **metod diagnozowania bezpośredniego** najczęściej są stosowane metody wymagające przerwania procesu skrawania. Polegają one na [80]:

- pomiarze ręcznym lub zautomatyzowanym wartości śladów zużycia na powierzchni przyłożenia ostrza,
- pomiarze wymiarów charakterystycznych ostrza (np. h – skrócenie narzędzia) w trakcie zaprogramowanego cyklu pomiarowego z użyciem czujnika umieszczonego w pobliżu strefy obróbki,
- weryfikacji obecności narzędzia lub tylko jego ostrzy podczas wprowadzania do strefy skrawania i podczas wychodzenia z tej strefy po zabiegu.

Metody pośrednie diagnozowania stanu ostrza narzędzia skrawającego wykorzystują różne zjawiska towarzyszące procesowi skrawania. Do zjawisk w mniejszym lub większym stopniu skorelowanych z zużyciem ostrza skrawającego należą [84]:

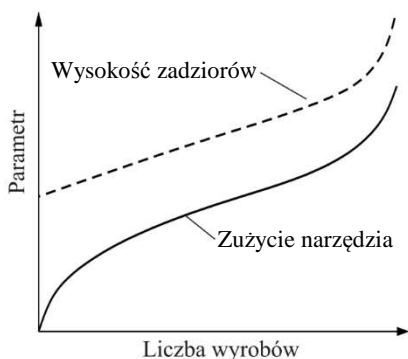
- działanie sił i momentów wynikające z wykorzystania energii ruchu głównego w procesach naruszania spójności materiału obrabianego,
- moc dostarczana do procesu skrawania – źródłem energii w procesie skrawania jest zazwyczaj silnik elektryczny, którego moc chwilową pobieraną z sieci energetycznej łatwo zmierzyć i zarejestrować,
- temperatura w strefie skrawania będąca parametrem zależnym od wielu czynników,
- emisja akustyczna – emisja materiałowa polegająca na generowaniu przez poddany wyężeniu materiał impulsowych pobudzeń w zakresie ultradźwiękowym,
- sygnały wibroakustyczne.

Zmiana wartości parametrów geometrycznych wyrobu spowodowana zużyciem narzędzi szczególnie dotyczy procesu wykrawania. Na krzywych zużycia powierzchni czołowych stempli do wykrawania można wyróżnić trzy zakresy zużycia (rys. 3.25), które odpowiadają docieraniu, umiarkowanemu zużyciu oraz zużyciu przyspieszonemu.

Diagnostyka stanu narzędzia na podstawie kontroli geometrycznych parametrów obrabianej części jest realizowana na obrabiarkach po zakończeniu procesu skrawania. W odróżnieniu od ciągłych metod diagnozowania (podrozdziały 3.1-3.4) diagnostyka w tym przypadku jest realizowana okresowo. Czasookres

kontroli określa się, korzystając z doświadczeń w stosowaniu danego narzędzia skrawającego w danych operacjach technologicznych albo opierając się na obliczeniach przewidywanego okresu trwałości narzędzia. Z okresową metodą diagnozowania są związane następujące trudności:

- zwiększenie się ogólnego czasu obróbki części wskutek procesów kontrolnych,
- brak możliwości wykrycia nieprognozowanych przyczyn utraty zdolności skrawnej narzędzia w czasie pracy, co może spowodować braki albo generować zakłócenia poprawnej pracy określonych zespołów obrabiarki.



Rys. 3.25. Wpływ zużycia powierzchni czołowej stempla na wysokość zadziorów na elementach wykrawanych, opracowano na podstawie [55]

Efektom dodatnim diagnozowania okresowego jest duża niezawodność diagnozowania zużycia, ponieważ w tym przypadku wyklucza się wpływ szeregu przypadkowych czynników procesu skrawania, które zakłócają dokładność diagnozowania metodami ciągłymi.

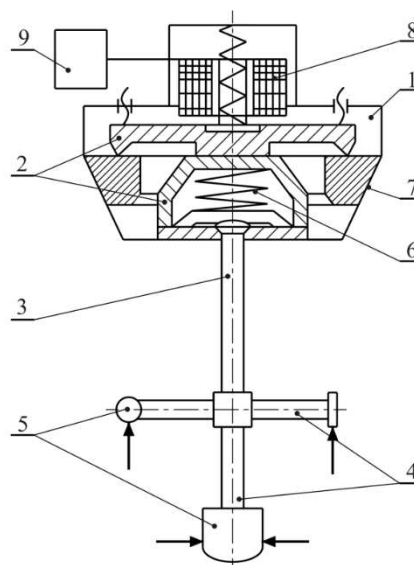
System monitorowania trwałości narzędzia w operacjach frezarskich stosującą statystyczną metodę wyznaczania wartości sił skrawania na podstawie danych z obróbki, zarówno narzędziem nowym, jak i o różnym stopniu zużycia, zaproponowali Lin i Yang [83]. Aktualny stan narzędzia był określony wektorem wartości trzech składowych sił skrawania zmierzonych na stałym odcinku toru narzędzia zawsze dla tych samych parametrów. Strategię monitorowania trwałości narzędzia w procesie frezowania z wykorzystaniem sił skrawania przedstawili również Elbestawi i inni [33]. Autorzy skorelowali widma mocy sił skrawania ze stopniem zużycia narzędzia na podstawie składowej zmiennej sygnału siły skrawania. Lin i Yang [83] zaproponowali inteligentny system monitorowania zużycia narzędzia on-line i procesu skrawania frezami o zakończeniu kulistym. Na podstawie zmierzonych wartości trzech składowych siły skrawania system oparty na algorytmie genetycznym określał stopień zużycia narzędzia. W systemie zbudowanym przez Köninga i Kettelera [76] sygnał składowych sił skrawania podczas toczenia ma szczególny charakter przed i w czasie przyspieszonego zużycia. W pierwszej fazie występuje szybki wzrost wartości sił, a następnie równie szybki spadek do zera lub niskich wartości. Badania ekspery-

talne wykazały, że uszkodzenie krawędzi skrawającej przeważnie nie przekracza wartości posuwu na jeden obrót przedmiotu.

3.4.2. Czujniki do pomiaru parametrów konstrukcyjnych części obrabianej i narzędzia

W kontroli parametrów obrabianej części i parametrów zużycia narzędzia stosuje się różne typy czujników montowanych na obrabiarkach. Pomiary mogą być realizowane bezpośrednio w strefie obróbki albo w specjalnie przewidzianej pozycji kontrolnej. Najszersze zastosowanie znalazły czujniki stykowe pozwalające na pomiar kontrolowanych wymiarów z dokładnością do jednego mikrometra.

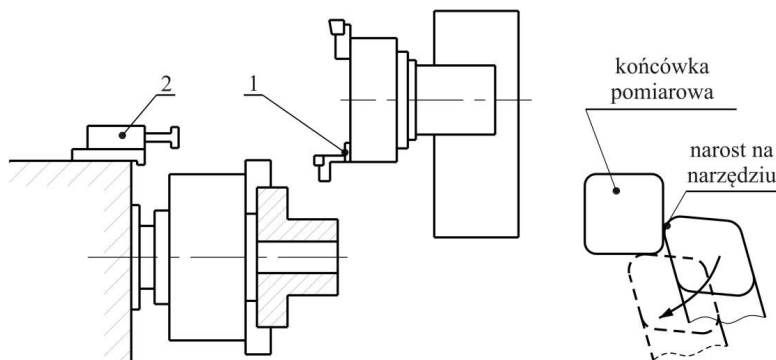
Czujniki stykowe produkuje m.in. firma Renishaw. Schemat działania końcówki pomiarowej czujnika przedstawiono na rys. 3.26. W korpusie (1) zamocowanym na ruchomej części obrabiarki jest umieszczony podzespół (2) końcówki pomiarowej (3). Końcówka posiada połączone między sobą trzpień (4) z elementami kontaktowymi (5). Urządzenie zabezpieczające (6) chroni przed zniszczeniem głowicy w przypadku dużego przemieszczenia końcówki.



Rys. 3.26. Schemat czujnika stykowego: 1 – korpus, 2 – podzespół kontrolny, 3 – końcówka pomiarowa, 4 – trzpień, 5 – element kontaktowy, 6 – urządzenie zabezpieczające, 7 – głowica pomiarowa, 8 – czujnik indukcyjny, 9 – układ zasilania i obróbki sygnałów, opracowano na podstawie [121]

Ponadto głowica posiada zespół łączący głowicę pomiarową (7), czujnik indukcyjny (8) i elektroniczny układ zasilania i obróbki sygnałów (9). Przy wychyleniu końcówki (3) w dowolnym pokazanym strzałkami kierunku oporowa tarcza (2) odwraca się w stosunku do osi prostopadłej do osi głowicy albo przemieszcza się wzdłuż osi. Razem z tarczą przemieszcza się związana z nią kotwica indukcyjnego czujnika (8). Powodowane tym zmiany sygnału elektrycznego

wykorzystuje się do określenia momentu styku części z końcówką głowicy. Aby uzyskać sygnał o momencie styku, wystarczy przemieścić końcówkę o wielkość $1 \mu\text{m}$ z naciskiem do $0,2 \text{ N}$. Do kontroli wymiaru części głowica pomiarowa jest ustawiona albo we wrzecionie obrabiarki zamiast narzędzia skrawającego, albo w gnieździe głowicy narzędziowej tokarki sterowanej numerycznie (TSN). Podczas pomiaru obrabiarka pracuje jako maszyna współrzędnościowa. Schemat pomiaru wymiarów obrabianej części i narzędzia na TSN przedstawia rys. 3.27.



Rys. 3.27. System pomiaru wymiarów obrabianej części i narzędzia: 1, 2 – głowice pomiarowe, opracowano na podstawie [121]

Aby określić zużycie ostrza według średnicy obrabianej części, końcówkę pomiarową głowicy (1, rys. 3.27) doprowadza się do kontaktu z obrabianą powierzchnią części, a współrzędną x_1 zapisuje w pamięci TSN. Następnie, po obróbce z założoną głębokością skrawania a_p , końcówkę doprowadza się ponownie do styku z powierzchnią obrabianą. Wartość nowej współrzędnej x_2 będzie równa:

$$x_2 = x_1 + a_p + \Delta \text{ [mm]} \quad (3.7)$$

gdzie: a_p – głębokość skrawania [mm],

Δ – błąd wymiaru spowodowany zużyciem narzędzia na powierzchni przyłożenia [mm].

Wstępnie otrzymana za pomocą programu komputerowego zależność $VB = f(\Delta)$ określa wartość zużycia VB . Głowica pomiarowa (2, rys. 3.27) może być zamocowana we wrzecionie obrabiarki. Odczyt zawsze przeprowadza się od współrzędnej styku końcówki głowicy z krawędzią skrawającą ostrego narzędzia. Wadą tej metody kontroli jest to, że na dokładność pomiaru może wpływać obecność na roboczych powierzchniach narzędzia narostu powstającego albo podczas samego procesu skrawania, albo wskutek przejściowych procesów przy wyjściu ostrza ze strefy skrawania. Opisane głowice pomiarowe stosuje się rów-

niez do bezpośredniej kontroli wartości zużycia lub określenia przewidywanego zużycia narzędzia.

Aby wykryć obecność narostu i wykruszeń krawędzi skrawającej, narzędzie przemieszcza się po specjalnej trajektorii względem końcówki głowicy pomiarowej (2, rys. 3.27). Do pomiaru wymiarów części obrabianej i narzędzia mają zastosowanie bezstykowe metody, w których zamiast mechanicznej sondy wykorzystuje się promień świetlny. Możliwe są następujące zasady pomiaru:

- promień świetlny odbija się od powierzchni mierzonej i jest rejestrowany za pomocą odbiornika,
- promień świetlny rzutuje mierzoną część obiektu na powierzchnię odbiornika.

Jako diagnostyczne cechy stanu narzędzia mogą być wykorzystane parametry chropowatości powierzchni obrabianej części. Chropowatość stopniowo wzrasta w miarę zużycia narzędzia na etapie normalnego zużycia i silnie wzrasta z początkiem katastroficznego zużycia. W związku z tym diagnostyka według chropowatości powierzchni jest możliwa zarówno dla technologicznego, jak i optymalnego kryterium zużycia narzędzia.

Do kontroli chropowatości zaleca się optyczne czujniki składające się z sondy, źródła światła, fotodiod i bloku elektronicznego obróbki sygnałów. Sonda posiada światłowody przeznaczone do przesyłania promienia od źródła do mierzonej powierzchni i światłowody przekazujące odwzorowany promień do fotodiod. Sygnał fotodiod zależący od intensywności odwzorowanego promienia jest przekazywany do elektronicznego bloku, który wyznacza wartości średnie parametru Ra na założonym odcinku pomiarowym. Istnieją również czujniki działające z wykorzystaniem promienia laserowego.

4. Automatyczne stanowiska do diagnozowania stanu procesu i narzędzia

4.1. Techniczne zapewnienie funkcjonowania automatycznego stanowiska do diagnozowania stanu procesu i narzędzia

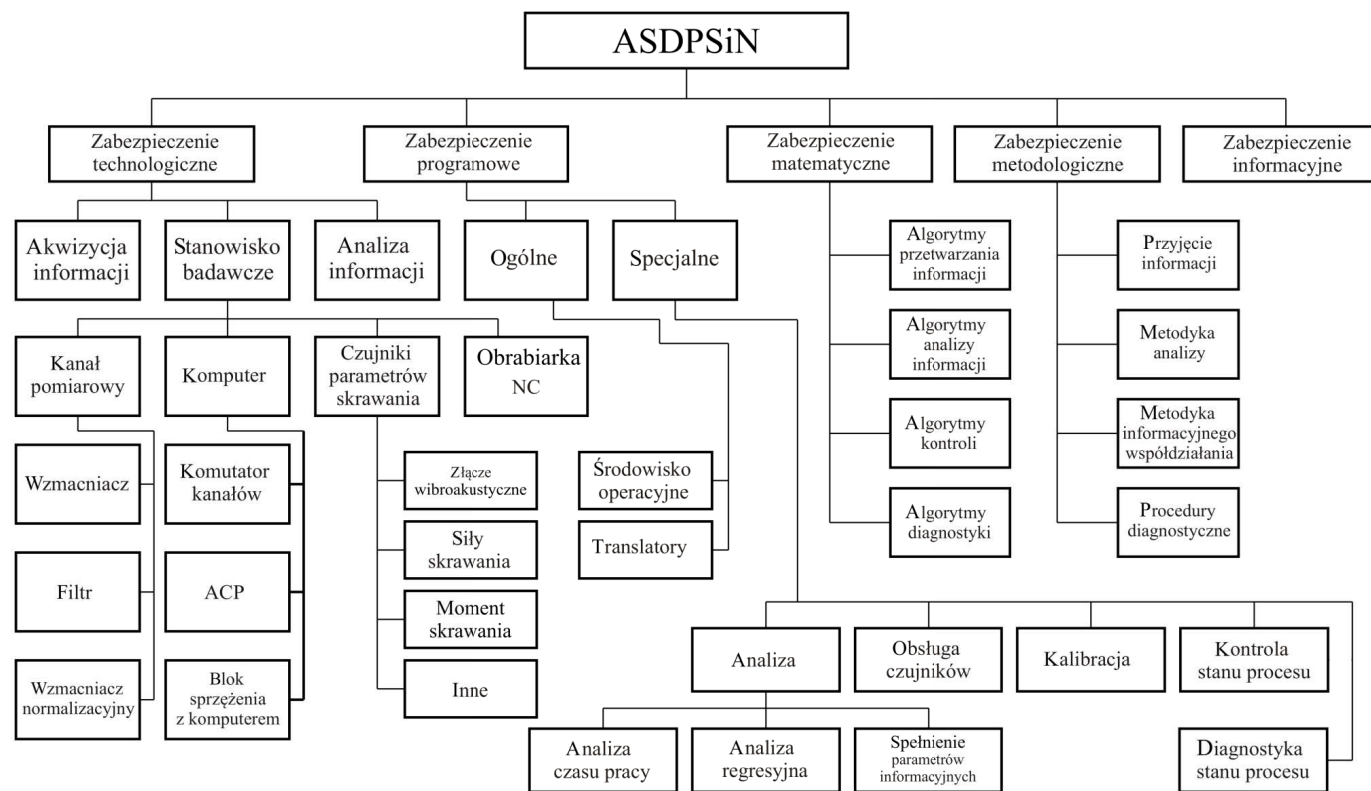
Naukowo-metodyczne podstawy opracowania systemów diagnostyki przedstawiono w rozdziale 1. Przeprowadzając badania diagnostyczne, stosuje się różne techniczne urządzenia tworzące stanowisko badawcze. W zależności od oprogramowania wyróżniamy niezautomatyzowane i zautomatyzowane stanowiska do diagnozowania stanu procesu i narzędzia. Stanowisko niezautomatyzowane zawiera obrabiarkę skrawającą wyposażoną w czujniki przetwarzające informacje pochodzące ze strefy obróbki przez analogową aparaturę analizy informacji, filtry, wzmacniacze, detektory rejestrujące, oscylografy, woltomierze itp. Tego typu stanowisko umożliwia rozwiązywanie zadań wyszukiwania możliwych zmian w narzędziu skrawającym w zależności od warunków jego eksploatacji i kryteriów stanu narzędzia oraz jego niezdatności do pracy. Poznanie odwzorowania tych zmian w informacjach pochodzących ze strefy skrawania spoczywa na pracowniku, a rezultaty w dużym stopniu zależą od jego kwalifikacji i dokładności realizacji procedur obliczeniowych. Główną wadą niezautomatyzowanych stanowisk jest brak możliwości wykorzystania wyników analizy w trakcie przeprowadzania eksperymentu (on-line). Nie można więc odnieść się do informacji zwrotnej do sterowania procesem skrawania w czasie rzeczywistym. Praktycznie zrealizowane i opisane w literaturze przykłady systemów diagnostyki wykorzystują różne cechy diagnostyczne. Ich różnorodność świadczy o tym, że nie ma uniwersalnej cechy, która może niezawodnie odzwierciedlać stan wszystkich typów narzędzi pracujących w różnych warunkach skrawania. Podczas budowania systemów diagnostycznych konieczne jest otrzymanie informacji ze strefy skrawania dotyczących każdego narzędzia, zarówno odnośnie do funkcjonalnych, jak i fizycznych parametrów skrawania w celu określenia parametru najbardziej informacyjnego. Ze względu na mnogość monitorowanych parametrów i objętość rejestrowanych informacji bez dodatkowego ich opracowania i przedstawienia w formie wygodnej do analizy (w postaci wykresów, tablic i histogramów) pracownik ma bardzo utrudnione i ograniczone możliwości kontroli procesu skrawania. Pracochłonność tego zadania można ograniczyć, stosując zaawansowane systemy komputerowe do przetwarzania sygna-

łów. Mimo trudności w obróbce informacji czas przeznaczony na jej opracowanie bez użycia komputera jest zdecydowanie dłuższy niż w przypadku procesu sterowanego za pomocą systemów diagnostycznych. Człowiek powinien być w jak największym stopniu wyłączony z procesu przetwarzania informacji pomiarowych i podejmowania decyzji. Można to uzyskać przez stosowanie automatycznego stanowiska do badań procesu obróbki skrawaniem, będącego jednocześnie pierwowzorem systemu diagnostyki narzędzia (rys. 4.1), zapewniającego:

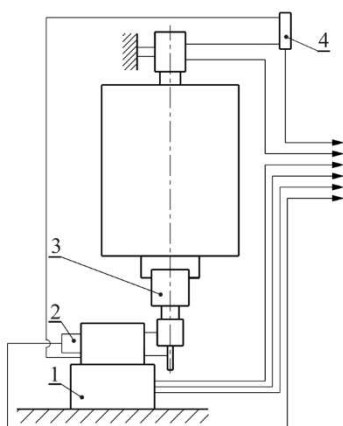
- zastosowanie szeregu czujników do monitorowania zmiany wartości parametrów procesu skrawania,
- analizę sygnałów oddzielnych czujników,
- przeprowadzenie kompleksu zadań badawczych realizowanych przez automatyczne stanowiska diagnostyki procesu skrawania i narzędzia (ASDPSiN).

Struktura ASDPSiN przedstawiona na rys. 4.1 zawiera charakterystyczny dla zautomatyzowanych systemów diagnostyki zestaw podstawowych elementów, do których należy zabezpieczenie techniczne, matematyczne, programowe, informacyjne i metodyczne. Zestaw głównych elementów określa specyfikę zadań rozwiązywanych w trakcie badań procesu skrawania. Głównym zadaniem ASDPSiN jest zabezpieczenie techniczne, od którego zależy realizacja postawionych zadań badawczych. W skład zabezpieczenia technicznego wchodzi stanowiska badawcze i urządzenia obróbkowe. Stanowisko jest tworzone z zastosowaniem obrabiarek NC wyposażonych w czujniki parametrów funkcjonalnych lub fizycznych procesu skrawania przekształcające wielkości tych parametrów w sygnały cyfrowe. Przykładowy schemat wyposażenia tokarki i frezarki w różne czujniki przedstawiono odpowiednio na rys. 3.3 i 4.2.

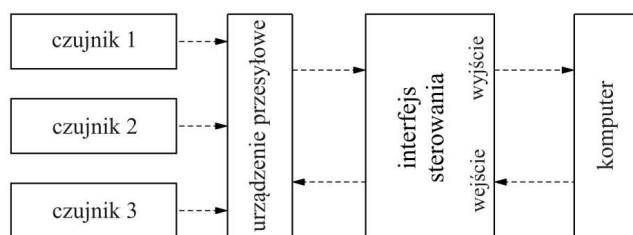
Dostępne na rynku czujniki służące do pomiaru parametrów procesu odzwierciedlających stan narzędzia scharakteryzowano w rozdziale 3. Do rejestracji wartości składowych sił skrawania są również stosowane dynamometry uniwersalne. Sygnały od czujników są transferowane do komputera za pomocą urządzenia sprzęgającego (rys. 4.3). W tym przypadku przez obiekty kontrolne rozumie się kompleks parametrów procesu skrawania, rejestrowanych podczas badań eksperymentalnych. Urządzenie sprzęgające (US) pozwala odbierać informacje analogowe z czujników, przekształcać je w formę cyfrową i przekazywać do komputera. Aby zapewniony był jakościowy i odporny na zakłócenia proces przesyłu danych, urządzenie sprzęgające obejmuje szereg elektronicznych podzespołów przeznaczonych do wzmocnienia, filtracji oraz normalizacji sygnału. Liczba kanałów urządzenia sprzęgającego odpowiada liczbie parametrów procesu skrawania rejestrowanych za pomocą czujników.



Rys. 4.1. Struktura i podstawowe elementy stanowiska ASDPSiN, opracowano na podstawie [121]



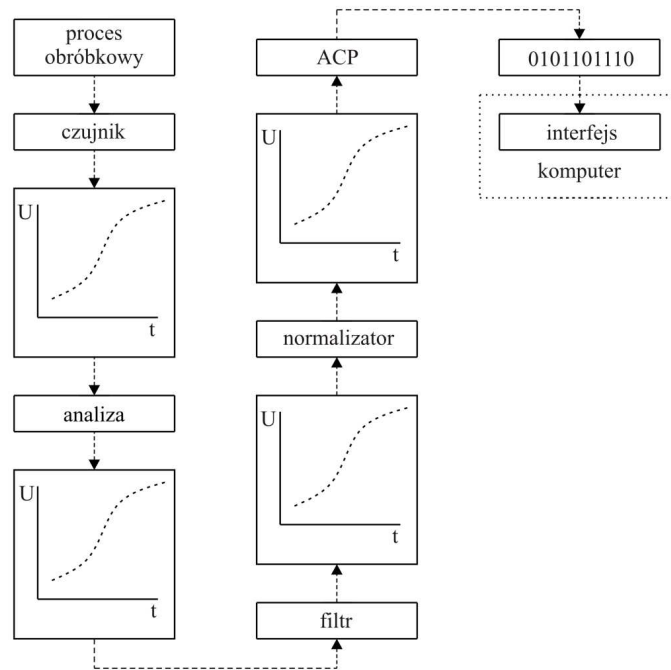
Rys. 4.2. Schemat wyposażenia frezarki w czujniki: 1 – dynamometr, 2 – czujnik wibracji, 3 – głowica do pomiaru siły, 4 – czujnik pomiaru siły elektrodynamicznej, opracowano na podstawie [121]



Rys. 4.3. Aparaturowa część stanowiska ASDPSiN, opracowano na podstawie [121]

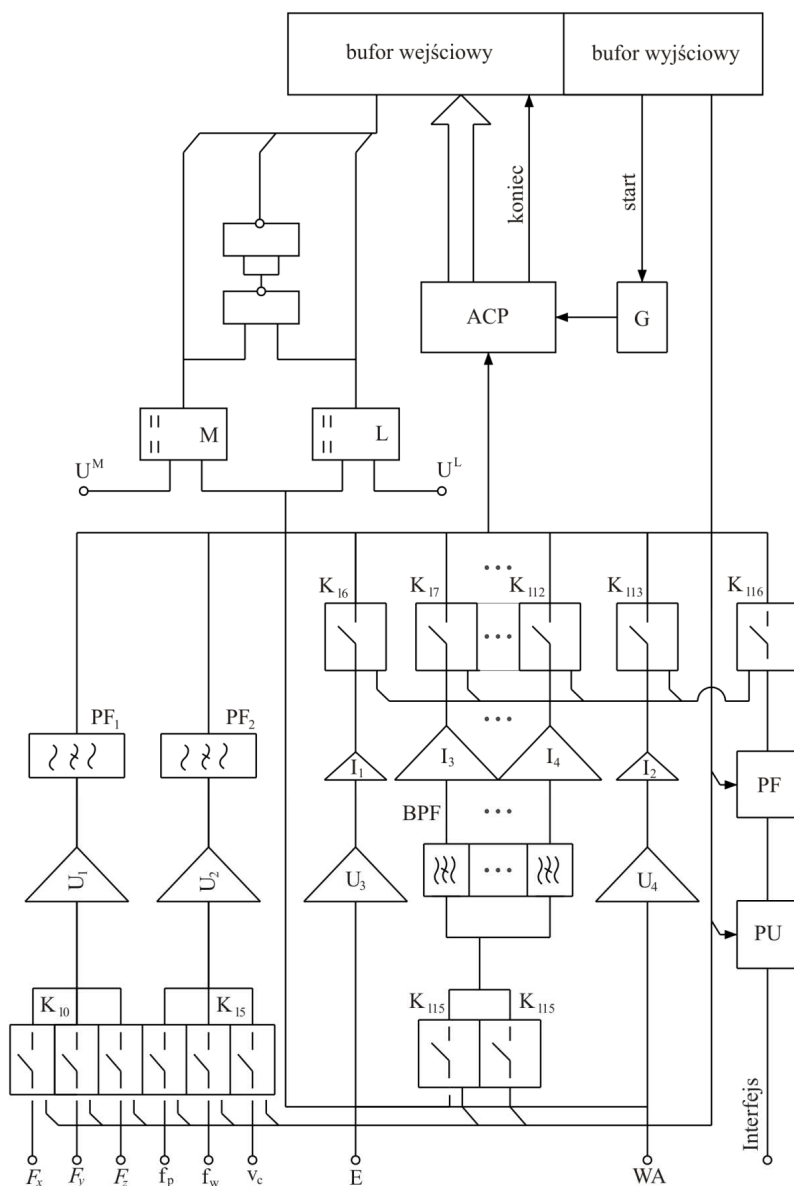
Schemat strukturalny jednego z kanałów wraz z kolejnością rejestracji sygnałów ze strefy skrawania przez elektroniczny moduł urządzenia sprzęgającego przedstawiono na rys. 4.4. Wykresy $v_c = f(t)$ odpowiadają za przekształcenia sygnałów odzwierciedlające funkcjonalne przeznaczenie każdego z węzłów. Zgodnie z parametrami zastosowanego czujnika (częstotliwość wejściowa) każdemu kanałowi pomiarowemu odpowiada zestaw charakterystyk, który powinien zapewnić jakościową transformację sygnału analogowego na sygnał cyfrowy. Przykładowy schemat takiej transformacji przedstawiono na rys. 4.5.

Kanał pomiarowy do podłączenia tensometrycznych czujników rejestrujących wartości składowych siły skrawania F_x , F_y i F_z , np. podczas toczenia, składa się z jednego bloku wzmacniająco-kondycjonującego (U_1). Jest to możliwe, ponieważ charakterystyka modułu pomiarowego określająca wartość wszystkich składowych jest bardzo podobna. Analogiczne podejście można zastosować podczas kalibracji kanału wprowadzającego sygnał prądowy w zespole sterowania obrabiarki NC: posuwu poprzecznego f_p , posuwu wzdłużnego f_w i ruchu głównego v_c . Połączenie czujnika kontroli wartości wymienionych parametrów do kanału normalizacyjnego odbywa się przez zwieranie odpowiedniego elementu K_{10} - K_{15} (rys. 4.5). Sygnały pochodzące z czujnika sygnału wibroakustycznego i sygnału siły elektrodynamicznej są wzmacniane odpowiednim



Rys. 4.4. Schemat strukturalny stanowiska pomiarowego, opracowano na podstawie [121]

szerokopasmowym wzmacniaczem oraz normalizowane odpowiednimi integratorami I_2 i I_3 , przełącznikami komutacyjnymi K_{16} , K_{17} , a następnie przesyłane do analogowo-cyfrowego przetwornika. W celu analizy zmian sygnałów W_A i E (rys. 4.5) w zakładanych przedziałach częstotliwości I_3 - I_{10} każdy z nich w wyniku komutacji elementów K_{114} i K_{115} może być skierowany do bloku pasmowej filtracji (BPF). Integratory umieszczone za blokiem pasmowej filtracji BPF i blokami szerokopasmowych wzmacniaczy U_3 i U_4 sygnałów W_A i EDS służą do ustalania odpowiedniej częstotliwości sygnału wejściowego, możliwej do przetworzenia przez analogowo-cyfrowy przetwornik (ACP). Sygnały W_A i EDS po przejściu przez moduł BPF są przesyłane do przetwornika ACP przez odpowiednie dla każdego pasma częstotliwości komutacyjne elementy K_{17} - K_{112} . Sterowanie kolejnością połączeń elementów komutacyjnych przeprowadza się za pomocą programu komputerowego. Aby rozdzielić sygnały pochodzące z czujników dla biegu jałowego i po zapoczątkowaniu procesu skrawania, urządzenie sprzęgające jest połączone z progowym dyskryminatorem ($M \& L$), który jest zintegrowany z kanałem sygnału wibroakustycznego W_A . Zapoczątkowanie procesu skrawania odpowiadające stykowi narzędzia z przedmiotem obrabianym określa się na podstawie poziomów sygnałów ustalonych dla dyskryminatora biegu jałowego. Główny kanał pomiarowy posiada wzmacniacz ze zmiennym współczynnikiem wzmocnienia PU i regulowany filtr PF . Zmiana charakterystyk jednostek PU i PF jest realizowana komputerowo.



Rys. 4.5. Schemat zasadniczy urządzenia sprzęgającego, opracowano na podstawie [121]

Funkcjonowanie urządzenia sprzęgającego *US* przebiega następująco (rys. 4.5):

- sygnały charakteryzujące stan obiektu są przesyłane od czujników przez odpowiednie analogowe przekaźniki K_{10} - K_{113} do analogowo-cyfrowego przetwornika w kolejności odpowiadającej zwiększaniu się numeru kanału,

- połączenie odpowiedniego kanału do modułu *ACP* ustala się programowo,
- kolejność przesyłu informacji z czujników podłączonych do kanałów pomiarowych modułu *ACP* może być dowolna.

W początkowym okresie skrawania odbierany z czujnika wibroakustycznego sygnał po przekroczeniu granicznej amplitudy ustalonej na poziomie L inicjuje proces rejestracji danych z określonego czujnika, np. R_x . Sygnał jest wzmacniany oraz normalizowany drogą komutacji klucza K_{10} (rys. 4.5). Klucz po odebraniu sygnału z interfejsu sterującego zamyka obwód. W określonym przedziale czasu na wibratorze G jest przesyłany sygnał do urządzenia umożliwiającego analogowo-cyfrową konwersję sygnału. Po zakończeniu tej konwersji moduł *ACP* generuje KONIEC (konwersji), po czym następuje wykonywanie kodu zapisującego wartości sygnału w pamięci operacyjnej komputera. Po zamknięciu przez klucz K_{10} obwodu następuje otwarcie kolejnego klucza w określonej sekwencji. Opisana procedura jest realizowana do momentu wystąpienia jednej z sytuacji:

- 1) wszystkie podłączone czujniki zostaną sprawdzone zadaną liczbą razy,
- 2) częstotliwość sygnału wibroakustycznego zmniejszyła się poniżej wartości zadanej w sytuacji braku kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym,
- 3) częstotliwość sygnału wibroakustycznego przekroczyła poziom N zadany w programie komputerowym i nagle zmniejszyła się do wartości ustawionej za pomocą przełącznika L , co oznacza awarię, tj. zniszczenie narzędzia.

Po wystąpieniu sytuacji drugiej wartość sygnału odpowiada poziomowi logicznemu „0” – w pamięci operacyjnej komputera na każdym kanale pomiarowym są zapisywane „0”. W końcu jest generowany komunikat BRAK OBRÓBKI, po którego wystąpieniu w systemie sterującym obrabiarki jest wywoływana funkcja STOP POSUW. Po zaistnieniu sytuacji trzeciej wartość sygnału $M \& L$ (rys. 4.5) odpowiada logicznemu poziomowi „1”. Następuje reakcja systemu analogiczna do sytuacji drugiej, najpierw jednak zatrzymuje się obrabiarka (STOP POSUW) i są wykonywane kolejne procedury. Działania powodowane reakcją systemu na sygnał $M \& L$ mogą być zablokowane przez program.

4.2. Budowa programów do funkcjonowania automatycznego stanowiska do diagnozowania stanu procesu i narzędzia

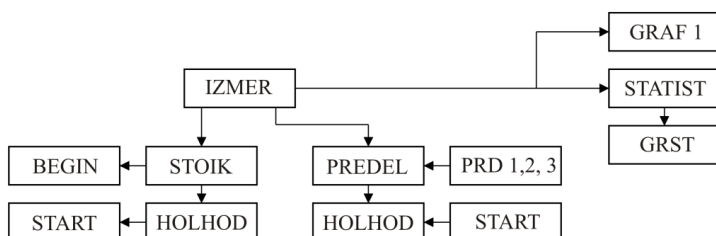
Zabezpieczenie programowe ASDPSiN jest realizowane w wielu językach programowania, z tym że pierwsze algorytmy powstawały w środowiskach FORTRAN lub ASSEMBLER. Kompletny system sterowania zawiera programy obsługi czujników, programy badań trwałościowych w określonym przedziale czasu do analizy sygnałów powstających przy zniszczeniu części skrawającej narzędzia oraz programy do obróbki zebranych informacji obejmujących:

- określenie statystycznych charakterystyk sygnałów,
- określenie częstotliwościowo-energetycznych widm przyjętych sygnałów,
- wyznaczenie funkcji korelacji i autokorelacji,
- graficzne przedstawienie uzyskanych zależności (np. na ekranie, w formie wydruku).

Programy obróbki danych powinny pracować niezależnie od programów obsługi czujników. Przykłady podstawowych algorytmów programów obsługi czujników stosowanych przy obróbce tokarskiej pokazano na rys. 4.6-4.8.

Struktura zabezpieczenia programowego ASDPSiN (rys. 4.6) przedstawia powiązania między poszczególnymi programowymi komponentami. Program główny (IZMER) jako moduł autonomiczny jest przeznaczony do zbierania informacji z czujników w czasie realizacji badań eksperymentalnych. Oprogramowanie modułu IZMER pozwala użytkownikowi na wybór trybu pracy:

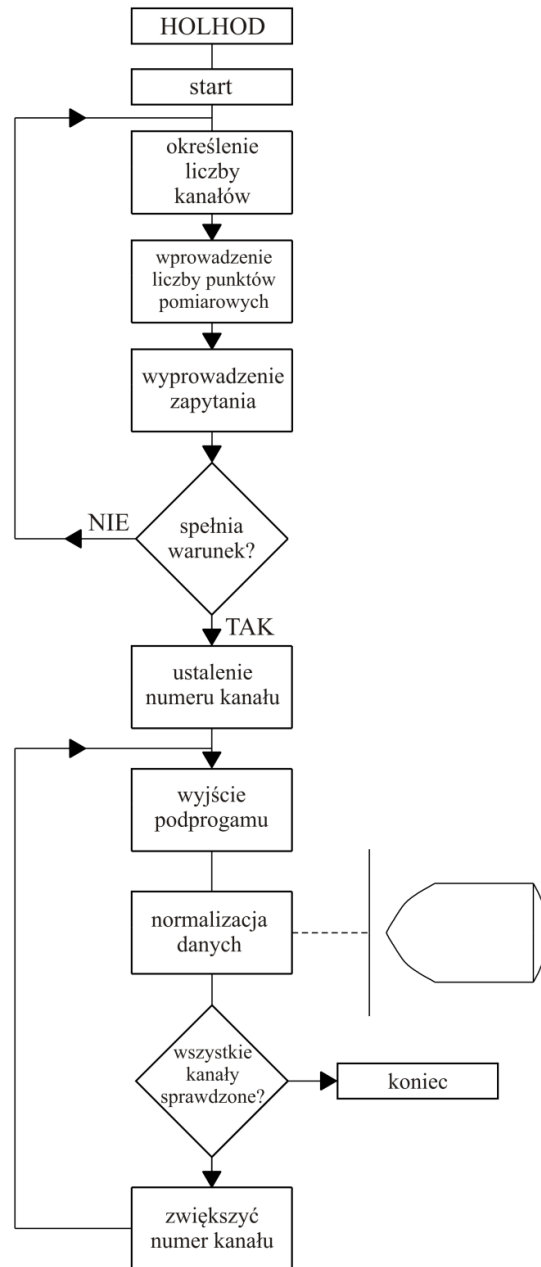
- rejestracja sygnałów pochodzących z czujników podczas badań trwałościowych,
- rejestracja sygnałów pochodzących z czujników podczas realizacji badań w warunkach założonych wartości zużycia narzędzia,
- obróbka statystyczna informacji.



Rys. 4.6. Struktura oprogramowania, opracowano na podstawie [121]

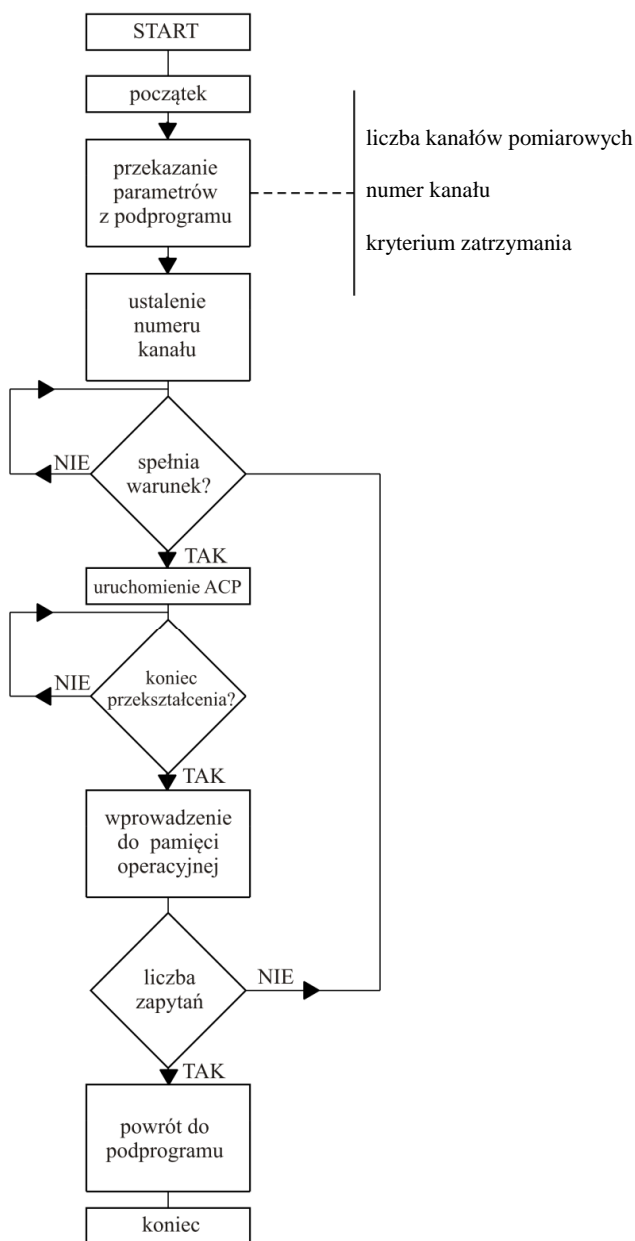
Praca z programem IZMER rozpoczyna się od określenia poziomu częstotliwości odpowiadającej biegowi jałowemu (brak skrawania), oddzielnie dla każdego z kanałów pomiarowych. Przedstawiona procedura jest realizowana podprogramem HOLHOD (rys. 4.7), który na podstawie poziomu szumu wyznacza średnią wartość sygnału każdego z kanałów pomiarowych. Rejestrację sygnałów pomiarowych przeprowadza podprogram START (rys. 4.8).

Po określeniu poziomu częstotliwości dla biegu jałowemu i jego zapamiętaniu w pamięci operacyjnej następuje przejście do odpowiedniego programu rejestrującego STOIK lub PREDEL. Podprogram STOIK ustala kolejność rejestracji z poszczególnych czujników, zatrzymuje wypełnianie procedury rejestracji danych oraz zapisuje zebrane informacje w pliku. Obsługę czujników w algorytmie STOIK realizuje podprogram BEGIN, który oczekuje na moment rozpoczęcia skrawania i zgodnie z założonym czasem na przejście narzędzia przekazuje sygnały do modułu STOIK. W czasie skrawania jest realizowana kontrola zuży-



Rys. 4.7. Algorytm podprogramu HOLDHOLD, opracowano na podstawie [121]

cia lub rejestracja zniszczenia narzędzia po przekroczeniu poziomu sygnału nastawionego na komparatorze M (rys. 4.5). W tej sytuacji sterowanie jest przekazywane do podprogramu STOIK. Jeżeli nie nastąpiło wygenerowanie sygnału „stan dopuszczalny przekroczony” podprogram BEGIN w obecności sygnału



Rys. 4.8. Algorytm podprogramu START, opracowano na podstawie [121]

logicznego „0” z komparatora L (rys. 4.5) kontynuuje „zgłaszanie” każdego z czujników wraz z częstotliwością dopuszczalną do modułu STOIK. W ten sposób do pamięci operacyjnej są zapisywane kolejne odczyty czujników przesunięte w czasie o wartość:

$$\Delta t = t_{dop} + t_{kom} + t_{pr} \text{ [min]} \quad (4.1)$$

gdzie: t_{dop} – czas trwania sygnału włączenia [min],
 t_{kom} – czas cyklu komutacji obejmujący podłączenie wymaganego kanału i czas przesyłania informacji z buforu do pamięci operacyjnej [min],
 t_{pr} – czas konwersji sygnału analogowego na sygnał cyfrowy [min].

Zadania realizowane przez moduł PREDEL pokrywają się z działaniami modułu STOIK, z tą jednak różnicą, że moduł PREDEL nie ma możliwości zarejestrowania sytuacji przekroczenia dopuszczalnych wartości sygnałów ustawionych na komparatorze M . W module PREDEL możliwe jest rozpoczęcie rejestracji sygnałów z maksymalną częstotliwością odpowiedzi natychmiast po zapoczątkowaniu styku narzędzia z przedmiotem obrabianym lub po przejściu przez narzędzie określonej drogi. Wyniki kontroli czujników zarówno programem STOIK, jak i programem PREDEL mogą być przedstawione na życzenie operatora w formie wizualizacji na ekranie monitora bądź wydruku.

Podprogramy statystycznej obróbki danych i ich wizualizacji są wydzielone jako oddzielne moduły i pozwalają na graficzne przedstawienie parametrów w wyjściowych plikach danych otrzymywanych z zastosowaniem podprogramów PREDEL i STOIK. Obejmują one:

- plik z wartościami parametrów statystycznych wyników badań trwałościowych,
- wykres realizacji dowolnego eksperymentu dla dowolnego kanału informacyjnego,
- wizualizację danych na ekranie monitora,
- wykresy opisujące kontrolę jednego doświadczenia wieloma czujnikami i kontrolę wielu doświadczeń jednym czujnikiem,
- wykresy zmian statystycznych zależności od numeru doświadczenia.

Automatyczne stanowisko do badań naukowych procesu obróbki skrawaniem zawiera podstawowe komponenty charakterystyczne dla działających systemów diagnostyki i jest ich pierwowzorem. Szczegóły technicznego i programowo-matematycznego zabezpieczenia systemów diagnostyki konkretnych narzędzi określa się za pomocą algorytmów diagnostycznych opartych na kryteriach stanu i wyjścia narzędzia z eksploatacji (rozdział 2.). Specyfika systemów jedno- i wieloparametrowej diagnostyki stanu narzędzia zostanie omówiona odpowiednio w rozdziałach 5. i 6.

5. Systemy jednoparametrowej diagnostyki stanu procesu i narzędzia

5.1. Rozpoznawanie zużycia narzędzia

Podstawowym celem diagnostyki procesu skrawania jest określenie właściwego okresu trwałości narzędzia, określenie momentu jego utraty zdolności skrawnej w celu wymiany i tym samym przywrócenia stanu jego zdolności w automatycznym systemie wytwarzania na liniach obróbkowych oraz określenie aktualnego jego stanu w celu sterowania procesem skrawania. Systemy diagnozowania stanu narzędzia powinny realizować następujące procedury:

- pomiar parametrów cech diagnostycznych stanu aktualnego i stanu jego niezdatności,
- rozpoznanie aktualnego stanu narzędzia i jego niezdatności,
- podjęcie decyzji odnośnie do jego wymiany albo sterowania procesem technologicznym.

Podstawowe zasady i środki pomiaru parametrów diagnostycznych cech oraz urządzenia przetwarzające sygnały dochodzące ze strefy skrawania przedstawiono w rozdziale 3. W systemach diagnostyki rozpoznawanie stanu narzędzia na podstawie uzyskanych ze strefy skrawania sygnałów realizuje się za pomocą podzespołów elektronicznych. Przyjęcie i obróbka informacji następuje on-line wraz z procesem skrawania. Wysoka częstotliwość pracy czujników pozwala rejestrować zmiany cech diagnostycznych zarówno podczas używania się narzędzia, jak i przy nieoczekiwanej utracie zdolności skrawnej na skutek zniszczenia i wykruszeń.

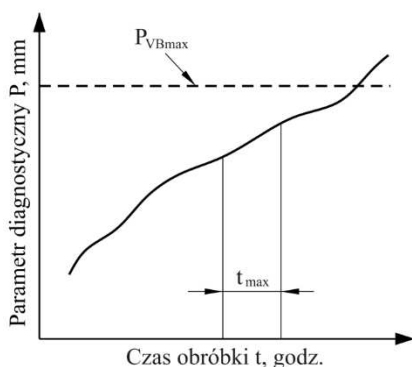
Rozpoznanie stanu narzędzia można przeprowadzić według dwóch zasadniczo różnych algorytmów. Aktualny stan narzędzia (wielkość zużycia VB) można określić według wcześniej zdefiniowanej w pamięci komputera zależności diagnostycznej cechy P od kryterium zużycia narzędzia VB . Na podstawie uzyskanej z czujnika aktualnej cechy P w programie wylicza się wartość VB . Dla VB równego przyjętej dopuszczalnej wartości jest spełnione kryterium utraty zdolności skrawnej narzędzia wskutek zużycia.

Można również zastosować zależność typu $P = f(VB, v_c, a_p, HB)$, uwzględniającą wpływ na P nie tylko zużycia VB , lecz również parametrów skrawania (v_c, a_p) i właściwości mechanicznych materiału obrabianego, na przykład twardości HB . Zastosowanie takich zależności rozpatrywano w rozdziale 3. podczas diagnostyki wiertel. Procedurę określenia zależności $P = f(VB, v_c, a_p, HB)$ i do-

puszczalnej wartości VB oraz wprowadzenie ich do pamięci komputera nazywa się uczeniem systemu diagnostyki.

W działających systemach diagnostyki algorytm jest najczęściej stosowany do rozpoznawania stanu niezdatności narzędzia. Aktualny sygnał diagnostyczny P porównuje się z wcześniej wprowadzoną do pamięci komputera wartością parametru P odpowiadającą poziomowi dopuszczalnej wartości zużycia podczas utraty zdolności skrawnej narzędzia wskutek zużycia, zniszczenia lub wykruszenia. Algorytm opisujący procedurę rozpoznania utraty właściwości skrawnych narzędzia wynika ze specyfiki rodzaju obróbki skrawaniem, system diagnostyki jest zaś wynikiem ustalenia dopuszczalnych zmian kontrolowanego sygnału oraz prędkości jego zmiany.

Przykładową diagnostykę zużycia narzędzia realizowaną według parametru diagnostycznego P , którego wartość wzrasta w przybliżeniu liniowo z upływem czasu pracy narzędzia w wyniku jego zużywania, przedstawiono na rys. 5.1.



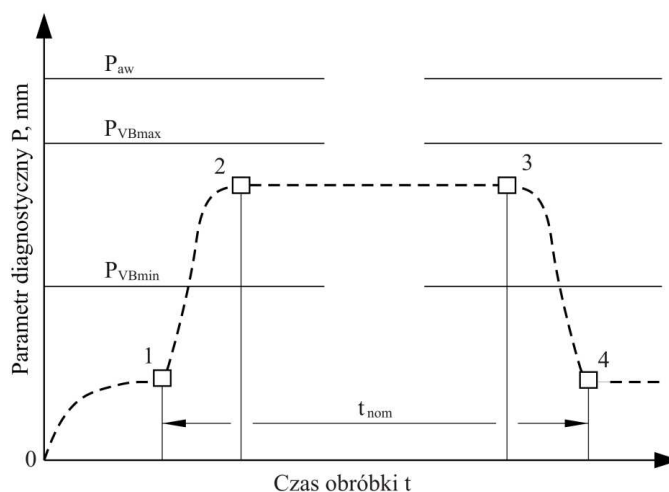
Rys. 5.1. Diagnostyka zużycia narzędzia realizowana według parametru diagnostycznego P , opracowano na podstawie [121]

Kryterium utraty zdolności skrawnej narzędzia jest spełnione wtedy, kiedy krzywa $P = f(t)$ przetnie ustaloną eksperymentalnie wartość dopuszczalnego zużycia VB , tj. P_{VBmax} . Aby określić ten moment w czasie realizacji całego czasu obróbki części, system diagnostyki okresowo odczytuje sygnał z czujnika parametru P . Aktualne średnie wartości parametru diagnostycznego P w analizowanym odcinku czasu przedstawiono na przykładzie krzywej diagnostycznej (rys. 5.2). Zależność $P = f(t)$ zbudowano według punktów reprezentujących wartości P otrzymane z wielu pomiarów odzwierciedlających realny obraz drgań jako losowego parametru w procesie skrawania.

Zastosowanie średniego sygnału jest możliwe tylko w diagnozowaniu zużycia, ponieważ prędkość zużycia jest niewielka, a losowe wskazania wartości P_{VBmax} można ustalić albo na podstawie wyników specjalnych badań, albo w czasie obróbki konkretnej części. W pierwszym przypadku badanie jest przeprowadzane według tradycyjnej teorii skrawania z uwzględnieniem charakteru parametrów procesu, co jest czasochłonne. W drugim przypadku wartość P_{VBmax}

ustala się, mnożąc aktualną wartość P zarejestrowaną podczas pracy ostrym narzędziem oraz tzw. współczynnik zapasu K_{\max} :

$$P_{VB_{\max}} = K_{\max} \cdot P \quad [\text{mm}] \quad (5.1)$$

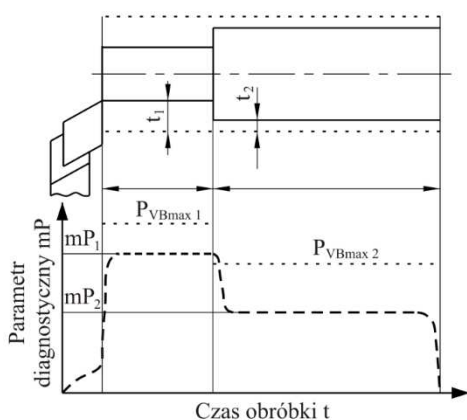


Rys. 5.2. Krzywa zmian parametru diagnostycznego: 0-1 – zakres dojścia narzędzia do przedmiotu, 1-2 – zakres zagłębiania narzędzia w materiał obrabiany, 2-3 – zakres obróbki, 3-4 – wyjście narzędzia z materiału obrabianego, opracowano na podstawie [121]

Wartość K_{\max} dobiera technolog jako współczynnik stały lub zależny od warunków obróbki. Uczenie powinno się prowadzić w tych samych warunkach, przy których narzędzie będzie realizować proces technologiczny, ponieważ od parametrów procesu skrawania, np. głębokości skrawania i posuwu, znacząco zależą wartości sygnałów diagnostycznych. W związku z tym uczenie powinno być związane z operacjami procesu technologicznego obróbki części. Podczas obróbki ostrym narzędziem wałka stopniowanego wartość oczekiwana kontrolowanej siły skrawania zmienia się więc w czasie według zależności przedstawionej na rys. 5.3. Z zależności $mP = f(t)$ (rys. 5.3) można wnioskować, że jeśli założy się stałą wartość K_{\max} , to dla każdego odcinka obróbki otrzyma się różne granice $P_{VB_{\max}}$. Przykład obróbki przedstawiony na rys. 5.3 dotyczy dwóch zabiegów obróbkowych.

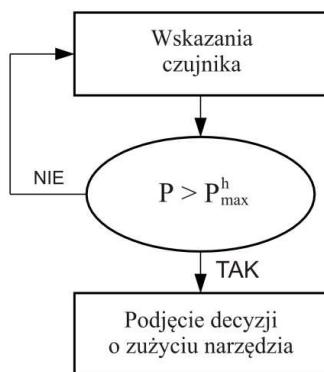
Badania wykazały, że dla określonego charakteru rozwoju miejsc zużycia można wyznaczyć charakterystyki niektórych diagnostycznych parametrów procesu skrawania. W przypadku dominującego zużycia powierzchni przyłożenia wartość siły skrawania ulega zmniejszeniu. Obniżeniu może również podlegać wartość amplitudy drgań o niskiej częstotliwości do określonej wartości zużycia na powierzchni przyłożenia. W tym przypadku do rozpoznania dopuszczalnego stanu zużycia narzędzia konieczne jest ustalenie nie górnej $P_{VB_{\max}}$, ale

dolnej granicy zużycia powierzchni przyłożenia P_{VBmin} . Procedura określenia wartości P_{VBmin} jest taka sama, jak dla P_{VBmax} . W literaturze przedmiotu parametry P_{VBmin} i P_{VBmax} często są nazywane granicami zużycia. Opisywaną procedurę diagnozowania nazywa się diagnozowaniem według założonych granic.



Rys. 5.3. Zmiana wartości oczekiwanej kontrolowanej siły skrawania w czasie obróbki wałka stopniowanego, opracowano na podstawie [121]

Budowę algorytmu diagnozowania zużycia podczas realizacji technologicznego zabiegu dla jednego ustawienia przedstawiono na rys. 5.4, a przykład algorytmu diagnozowania zużycia podczas realizacji operacji według metody granic na rys. 5.5 – procedura diagnozowania rozpoczyna się od wprowadzenia wartości granic odpowiadających numeracji realizowanego zabiegu technologicznego.

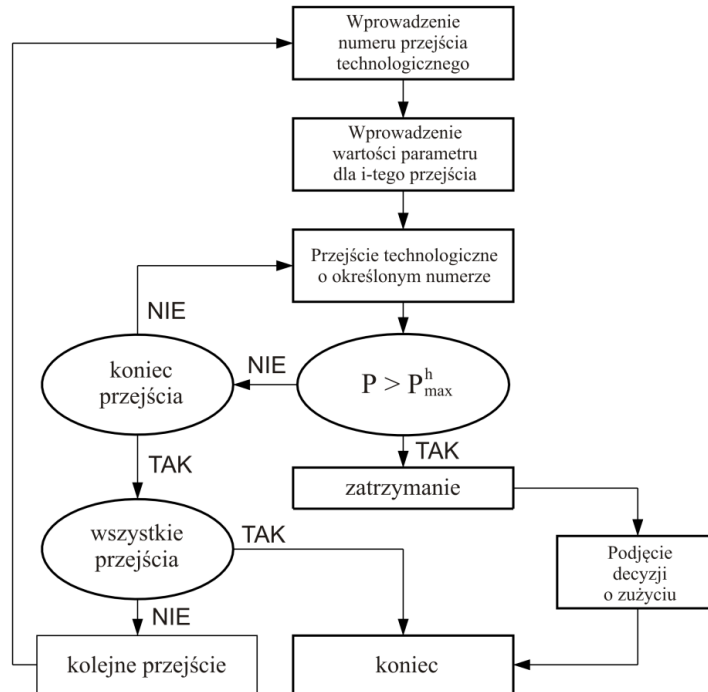


Rys. 5.4. Algorytm diagnozowania zużycia podczas realizacji technologicznego zabiegu dla jednego ustawienia, opracowano na podstawie [121]

Podczas rozpoznawania zużycia często zachodzi konieczność wykorzystania nie tylko średniej wartości parametru diagnostycznego, lecz także innych statystycznych charakterystyk oraz matematycznego przekształcania sygnałów.

Jeżeli nie można określić wartości informacyjnej cechy diagnostycznej narzędzia, w skład algorytmu diagnozowania wprowadza się algorytm obliczeń tych wielkości. Algorytm ten jest konieczny do wydzielenia informacji składo-

wej z ogólnej siły mierzonej czujnikiem. Taka konieczność zachodzi wtedy, kiedy czujniki do pomiaru siły są oddalone od strefy obróbki i zamontowane przykładowo w węzłach oporowych śrub. Mierzona za ich pomocą siła (rozdział 3.), składa się z siły skrawania i siły koniecznej do pokonania tarcia przy przemieszczeniach elementów składowych mechanizmu posuwu. Dla zwiększenia niezawodności diagnostyki celowe jest wyeliminowanie drugiej składowej.



Rys. 5.5. Algorytm diagnozowania zużycia podczas realizacji operacji według metody granic, opracowano na podstawie [121]

Specyfiką rozpoznawania zużycia według parametrów drgań jest konieczność obróbki sygnałów uzyskiwanych od akcelerometrów w postaci bardzo krótkich impulsów. Wymaga to zastosowania komputerów o dużej szybkości działania. Podobnie jak w algorytmach opartych na kontroli sił, diagnozowanie stanu opiera się na podstawie wartości założonego minimalnego i maksymalnego poziomu drgań. Skomplikowanie algorytmu jest związane z koniecznością wyeliminowania dużej liczby zbędnych sygnałów zacierających rzeczywisty obraz zmiany otrzymanego sygnału. Szkodliwe sygnały z punktu widzenia diagnostyki mogą być spowodowane przemieszczeniem dowolnego mechanizmu obrabiarki, włączeniem pompy chłodziwa itp. Algorytm diagnostyki powinien więc nie tylko porównywać amplitudy drgań, ale również właściwie wybierać moment spełnienia kryterium utraty zdolności skrawanej narzędzia. Zalecanymi

sposobami kontroli stanu narzędzia są sposoby oparte na wykorzystaniu elektrycznych zjawisk powstających w procesie skrawania. Do diagnostyki można zastosować sygnały zarówno stałej, jak i zmiennej składowej siły elektrodynamicznej skrawania *EDS*. W przypadku wykorzystania stałej składowej siły o zużyciu narzędzia można sądzić tylko wtedy, kiedy przy wszystkich innych równych parametrach skrawania stosunek $R_O/R_K = \text{const}$, gdzie R_K i R_O to naprzemienne elektryczne opory styku odpowiednio narzędzia i wióra oraz narzędzia i części obrabianej, tj. opór na powierzchniach przyłożenia i natarcia ostrza narzędzia. W przypadku dominującego zużycia na powierzchni przyłożenia wraz ze wzrostem powierzchni zużycia *VB* wartość siły *EDS* będzie się zmniejszać znacznie szybciej niż ma to miejsce przy zużyciu na powierzchni natarcia, natomiast w przypadku dominującego zużycia na powierzchni natarcia – wartość siły *EDS* będzie wzrastać.

Wykorzystanie w charakterze diagnostycznej cechy parametrów drgań w różnych zakresach częstotliwości, temperatury, siły *EDS* itp. zasadniczo nie zmienia procedury uczenia algorytmu diagnozowania zużycia narzędzia. W przypadku obróbki partii części wartość bieżących sygnałów porównuje się z wartościami nastawionymi. Po osiągnięciu wartości aktualnej nastawy system diagnostyczny wyzwala polecenie w obrabiarce NC inicjujące wyłączenie obrabiarki i wymianę narzędzia.

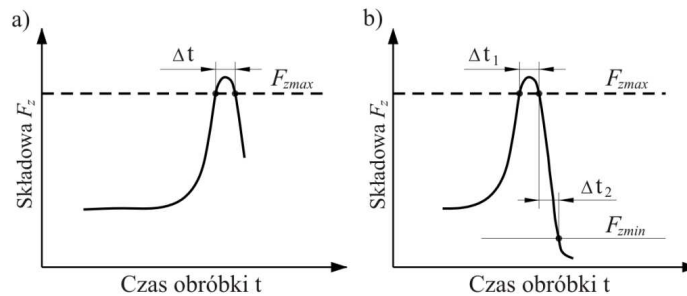
5.2. Rozpoznawanie zniszczenia narzędzia

Podczas budowy algorytmu diagnozowania zniszczenia narzędzia mogą wystąpić liczne trudności ze względu na różnorodne przyczyny zniszczenia. Do podstawowych przyczyn zniszczenia narzędzia zalicza się:

- nieoczekiwany wzrost wartości siły skrawania,
- stopniowy do dopuszczalnej wartości wzrost siły skrawania powodujący zużycie narzędzia lub jego cieplną deformację – zniszczenie z tej przyczyny poprzedza nie tylko wzrost siły i momentu skrawania, lecz także wzrost częstotliwości drgań,
- zmęczeniowe procesy mechaniczno-cieplne w materiale narzędzia – zniszczenie narzędzia może być poprzedzone zwiększeniem amplitudy i częstotliwości drgań, podczas gdy wartość siły skrawania nieznacznie się zmienia.

Złożoność procesu diagnozowania zniszczenia jest rezultatem możliwej różnorodności wzajemnego oddziaływania oddzielających się przy zniszczeniu części skrawającej płytki i części obrabianej. Zniszczenie ostrza jest skutkiem sił działających na część skrawającą narzędzia. W związku z tym siła powinna być informacyjną cechą diagnostyczną zniszczenia. Większość stosowanych w praktyce algorytmów diagnostycznych zniszczenia i zużycia jest opartych na wykorzystaniu siły skrawania jako diagnostycznej cechy utraty zdolności skrawnej narzędzia.

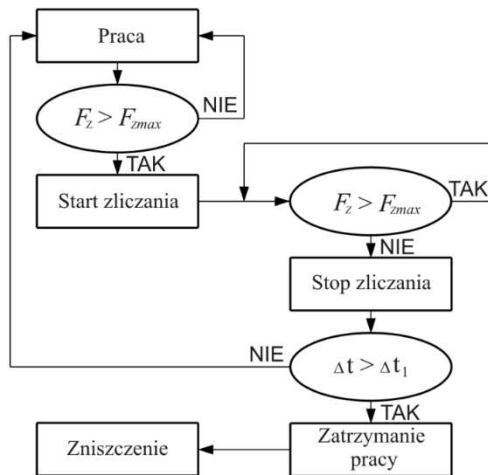
Jak wykazują badania, specyfika procesu toczenia sprawia, że zniszczenie narzędzia odzwierciedla zmiana wartości siły składowej F_z . I tak, przy zniszczeniu wskutek losowego wzrostu wartości siły składowej F_z w czasie utrata zdolności skrawnej narzędzia charakteryzuje się zależnością przedstawioną na rys. 5.6a, tj. po niewielkim zwiększeniu siły ponad granicę F_{zmax} następuje jej szybki spadek. Czas Δt , w którym wartość siły F_z przekracza wartość F_{zmax} , wynosi 0,1 ms. Czas ten charakterystyczny dla procesu zniszczenia jest znacznie krótszy od czasu wzrostu siły wskutek np. zwiększenia głębokości skrawania a_p . Algorytm wykluczenia udziału krótkookresowego zniszczenia wprowadza kryterium zatrzymania wzrostu Δt między początkiem przewyższenia F_{zmax} a formułowaniem informacyjnym zniszczenia. Informacja o zniszczeniu jest generowana wtedy, kiedy $F_z > F_{zmax}$ w okresie dłuższym niż Δt_1 . Wartość Δt jest określana eksperymentalnie. Dla zwiększenia niezawodności rozpoznawania zniszczenia noży skrawających przyjmuje się inne podejście do formułowania algorytmu zniszczenia (rys. 5.7). Ustalono eksperymentalnie, że przy zniszczeniu płytki skrawającej noża siła skrawania przez krótki czas przewyższa F_{zmax} , po czym szybko się obniża do wartości mniejszej F_{zmin} (rys. 5.6b).



Rys. 5.6. Wzrost wartości siły składowej P_z w czasie przy zniszczeniu dla kryterium jednostronnego P_{zmax} (a) i dwustronnego $F_{zmax} - F_{zmin}$ (b), opracowano na podstawie [121]

Moment przejścia aktualnej wielkości F_z przez granicę F_{zmax} i F_{zmin} rejestruje się, wyznaczając czas Δt_1 przewyższenia przez siłę F_z granicy F_{zmax} oraz czas Δt_2 od momentu przejścia granic F_{zmax} i F_{zmin} . Decyzję o zniszczeniu minimalnym podejmuje się, jeśli $\Delta t_1 \leq \Delta t_1^{ET}$ i $\Delta t_2 \leq \Delta t_2^E$, gdzie Δt_1^{ET} i Δt_2^E – okresy ustalone eksperymentalnie. W przypadku gdy zniszczenie narzędzia ma charakter zmęczeniowy, wartość siły skrawania poprzedzająca zniszczenie nie ulega zwiększeniu. Po zniszczeniu w zależności od charakteru oddzielenia się płytki od strefy skrawania siła gwałtownie spada lub stopniowo zmniejsza się do wartości F_{zmin} (rys. 5.8). W odniesieniu do algorytmu rozpoznającego zniszczenie oznacza to, że sygnał o zniszczeniu powinien być formułowany jako $F_z < F_{zmin}$. Aby wyeliminować fałszywe komendy powodujące spełnienie tej nierówności spowodowanych losowym zmniejszeniem siły, wprowadza się zatrzymanie

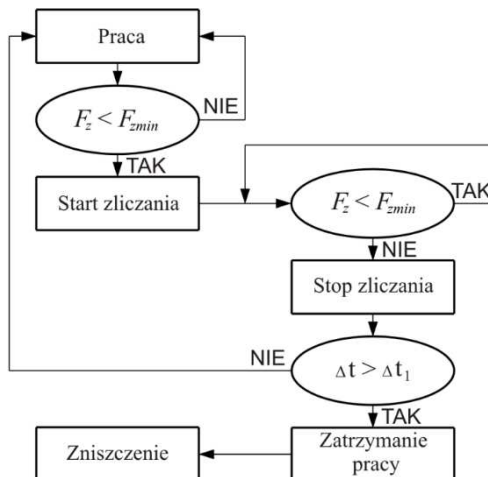
w okresie Δt , który jest krótszy niż czas prowadzący do spełnienia tej nierówności. Algorytm zniszczenia dla tego przypadku przedstawiono na rys. 5.9.



Rys. 5.7. Algorytm diagnostyki stanu wiertła na podstawie wartości F_{zmax} , opracowano na podstawie [121]

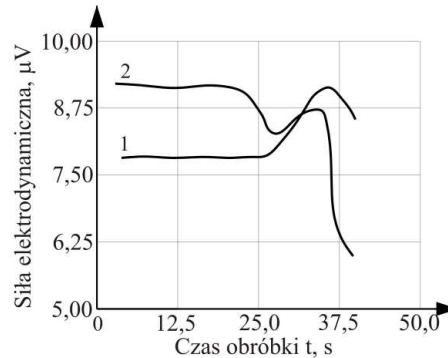


Rys. 5.8. Zmiana siły F_z spowodowana zniszczeniem wiertła, opracowano na podstawie [121]



Rys. 5.9. Algorytm zniszczenia wiertła na podstawie wartości siły F_z , opracowano na podstawie [121]

Obok sygnału zmian wartości siły F_z jako przykład sygnału diagnostycznego zniszczenia wykorzystuje się sygnał siły elektrodynamicznej skrawania (EDS), sygnał emisji wibroakustycznej itd. Zmiana wartości siły elektrodynamicznej skrawania podczas toczenia płytki skrawającej przy wzdłużnym toczeniu bez naruszenia i z naruszeniem styku z obrabianym materiałem przedstawiono na rys. 5.10. Widoczna jest wyraźna gwałtowna zmiana siły $EDS = f(R_o/R_k)$.



Rys. 5.10. Zmiana wartości siły elektrodynamicznej skrawania podczas toczenia wzdłużnego: 1 – bez naruszenia, 2 – z naruszeniem kontaktu z materiałem obrabianym, opracowano na podstawie [121]

Amplituda sygnału wibroakustycznego w dużym stopniu zależy od charakteru deformacji i typu zniszczenia w strefie kontaktu [53]. Podczas powstawania mikropęknięć i zniszczenia części skrawającej płytki amplituda drgań sygnału akustycznego znacznie wzrasta. Zjawisko to wykorzystuje się w diagnozowaniu zniszczenia narzędzia. Konieczność określenia informacyjnego zakresu częstotliwości dla każdego warunku skrawania i wydzielenia informacyjnego sygnału w warunkach oddziaływania wielu zakłóceń sprawiła, że opracowanie algorytmów decydujących o stanie narzędzia i programów do obróbki sygnałów diagnostycznych realizuje się dla każdej obrabianej części z uwzględnieniem technologii obróbki, parametrów skrawania oraz parametrów narzędzia.

Dane konieczne do pracy systemu są przygotowywane przez technologa. Proces diagnostyki powinien być zsynchronizowany z programem sterującym obrabiarki NC. W programach sterujących przewiduje się algorytmy obróbki części, w których działa konkretny wycinek programu kontroli. Po rozpoznaniu utraty zdolności skrawnej narzędzia w urządzeniu diagnostycznym są aktywowane komendy zakończenia procesu obróbki, wyłączenia obrotów wrzeciona i wycofania narzędzia ze strefy skrawania. Przerwa w obróbce wykańczającej celem rozpoznania dopuszczalnego zużycia najczęściej jest nierealna, ponieważ może wpłynąć na jakość obrabianej części. W tym przypadku możliwe jest realizowanie procesu skrawania, aż do zakończenia całkowitej obróbki powierzchni części, przy czym mogą być algorytmicznie uwzględniane kryteria wykluczające katastroficzny rozwój zużycia.

Układy diagnostyczne do monitorowania stanu zużycia ostrza narzędzia oparte na pośrednich wskaźnikach zużycia najczęściej wykorzystują siły skrawania, emisję akustyczną i drgania. Skuteczność kilku metod wyboru miar sygnałów, na podstawie których jest oceniane zużycie ostrza w strategiach wykorzystujących wiele miar, przeprowadzili Bombiński i Jemielniak [8].

Do wykrywania naturalnego stępienia narzędzia coraz częściej stosuje się miary wyznaczone z jednego sygnału pierwotnego (np. amplituda sygnału w poszczególnych pasmach) lub z kilku różnych sygnałów pochodzących z różnych czujników (np. sił skrawania i emisji akustycznej) [61]. Do integracji wybranych miar najchętniej stosuje się m.in. sztuczne sieci neuronowe [1, 63, 131, 142, 152] oraz logikę rozmytą [132, 147, 153] o strukturze Mamdaniego [125] lub Takagi-Sugeno [23].

5.3. Rozpoznawanie innych rodzajów utraty zdolności skrawnej narzędzia

Nieprawidłowa ocena stanu narzędzia i procesu skrawania może nastąpić wskutek losowych, niekorzystnych zjawisk podczas realizacji procesu technologicznego obróbki części. Powstawanie wstęgowego wióra w procesie skrawania jest niedopuszczalne, ponieważ:

- może doprowadzić do wykruszenia krawędzi skrawających,
- może zakłócić stałość styku czujników zamocowanych na obrabiarce,
- utrudnia odczyt sygnałów parametrów obróbkowych z przestrzeni obróbki.

Podczas obróbki na tokarkach, gdzie powstanie niesprzyjającego wióra jest najbardziej niebezpieczne, problem jego rozdrobnienia lub zwijania rozwiązuje się na etapie projektowania procesu technologicznego przez stosowanie płytek skrawających z łamaczami wióra oraz określenie parametrów skrawania zapobiegających powstawaniu rozdrobnionego wióra.

W procesie eksploatacyjnym narzędzia wiór może przybierać niekorzystny kształt. Jest to spowodowane przede wszystkim zużyciem powierzchni ostrza narzędzia, zmianą geometrii i kształtu ostrza, zmianą właściwości materiału obrabianego i innymi przyczynami. W związku z tym konieczne jest diagnozowanie kształtu wióra. Zadanie rozpoznawania kształtu wióra nie zostało do końca rozwiązane, ponadto nie ma produkcyjnych systemów diagnostycznych wióra. Wyniki przedstawione w literaturze są oparte tylko na oprogramowaniu systemów rozpoznawania kształtu wióra według charakteru drgań lub sił skrawania. Niezawodność niedopracowanych systemów jest jednak niewielka.

Dalsze prace nad systemami rozpoznawania kształtu wióra powinny być oparte na wieloparametrycznej diagnostyce. Każdemu kształtowi wióra powinno odpowiadać określone połączenie z nim parametrów fizycznych zjawisk procesu skrawania. Podczas obróbki wykańczającej jedną z przyczyn utraty zdolności skrawnej narzędzia może być narost na powierzchni natarcia. Z teorii skrawania

wiadomo, że narost jest niedopuszczalny przy obróbce powierzchni o dużej gładkości. Podstawowym parametrem procesu skrawania wpływającym na intensywność tworzenia narostu jest prędkość skrawania v_c . Podczas projektowania procesu technologicznego zakłada się również takie wartości parametrów skrawania, które wykluczają tworzenie się narostu. Podczas eksploatacji narzędzia w związku z zużyciem jego roboczej powierzchni przy założonych parametrach skrawania może się pojawić narost zmieniający gładkość powierzchni obrabianej. W związku z tym konieczne jest rozpoznanie momentu pojawienia się narostu.

W ostatnim dziesięcioleciu szeroko rozwijane są metody oparte na laboratoryjnych systemach wizyjnych do diagnostyki stanu narzędzia skrawającego, w tym do kontroli wielkości narostu na narzędziu. W większości systemów stosuje się kamery rejestrujące obraz w świetle widzialnym [157]. Podjęto również próby wykorzystania w tym celu podczerwieni [117] lub światła lasera [67]. Systemy wizyjne bezpośrednie stosują metody trój- [143] oraz dwuwymiarowe [119], w których analiza opiera się na obserwacji powierzchni narzędzia [120, 130].

W literaturze wskazuje się również na doświadczalną metodę rozpoznawania tworzenia się narostu na podstawie zmiany wartości siły *EDS* podczas skrawania. W praktyce określa się obecność narostu narzędzia drogą stykowych lub optycznych metod pomiarowych po zakończeniu operacji technologicznej.

6. Wieloparametryczna diagnostyka stanu narzędzia

6.1. Cechy diagnostyczne parametrów skrawania

Przedstawione w rozdziale 5. algorytmy jednoparametrycznej diagnostyki znalazły w praktyce szerokie zastosowanie. Proces rozpoznawania utraty zdolności skrawnej narzędzia sprowadza się do ustalenia momentu przekroczenia przez mierzony parametr dopuszczalnej wartości określonej na etapie uczenia systemów diagnostyki. Zaletą takich systemów diagnostyki jest prostota realizacji i minimalny czas wypracowania decyzji o utracie zdolności skrawnej narzędzia. W ten sposób eliminuje się konieczność uwzględnienia wartości czynników procesu skrawania. Podczas ich zmiany niezbędne jest jednak przeprowadzenie od nowa uczenia systemu dla ustalenia wartości mierzonych parametrów odpowiadających stanowi utraty zdolności skrawnych narzędzia. Oprócz tego eliminuje się konieczność określenia aktualnego kryterium stanu narzędzia, np. wartości zużycia na powierzchni przyłożenia. Utrudnia to efektywną eksploatację narzędzia przy zmieniającym się czasie założonego okresu trwałości w warunkach skrawania, co jest typowe dla produkcji małoseryjnej.

Uniknięcie przedstawionych utrudnień jest możliwe podczas diagnozowania z zastosowaniem zależności matematycznych ustalających związki między wielkością kryterium stanu narzędzia a mierzonymi parametrami procesu skrawania (cechy diagnostyczne). W tym przypadku w zależnościach powinny być uwzględniane podstawowe parametry v_c , a_p , t . Pod uwagę mogą być również brane najbardziej znaczące losowe czynniki wykazujące znaczący wpływ na aktualny stan narzędzia. W odróżnieniu od parametrów sterujących znaczenie parametrów wymuszających jest nieznane. W momencie rozpoznawania nieznane jest także aktualne znaczenie kryteriów stanu narzędzia, wówczas dla rozpoznania stanu narzędzia konieczne jest posiadanie $n + 1$ zależności, gdzie n – liczba uwzględnianych czynników wymuszających. Równoczesne rozwiązanie układu równań pozwala określić aktualne znaczenie kryteriów stanu, np. zużycia. Taka zasada diagnozowania może być realizowana przy pomiarze $n + 1$ diagnostycznych parametrów procesu skrawania (diagnostyka wieloparametryczna). Przykład realizacji tej zasady wieloparametrycznego diagnozowania będzie rozpatrzony podczas diagnozowania stanu wiertel ze stali szybkoobrotowej wykonujących otwory w żeliwie (podrozdział 6.2). Diagnostyka cech jednego parametru może nie zapewniać dużej niezawodności rozpoznawania stanu narzędzia wskutek pojawienia się fałszywych sygnałów o utracie zdolności skraw-

nej narzędzia spowodowanej losowymi wskazaniem diagnostycznego parametru poza granice dopuszczalnych wartości. Niezgodność rozpoznawcza może być zwiększona, jeśli decyzje o utracie trwałości narzędzia będą podjęte w warunkach, w których wartości maksymalnych parametrów diagnostycznych przewyższają ustalone dla nich na etapie uczenia dopuszczalne wartości. Przykład realizacji takiej dwuparametrowej diagnostyki przedstawiono w podrozdziale 6.3 dla wiertel ze stali szybko tnących podczas wykonywania otworów w stali.

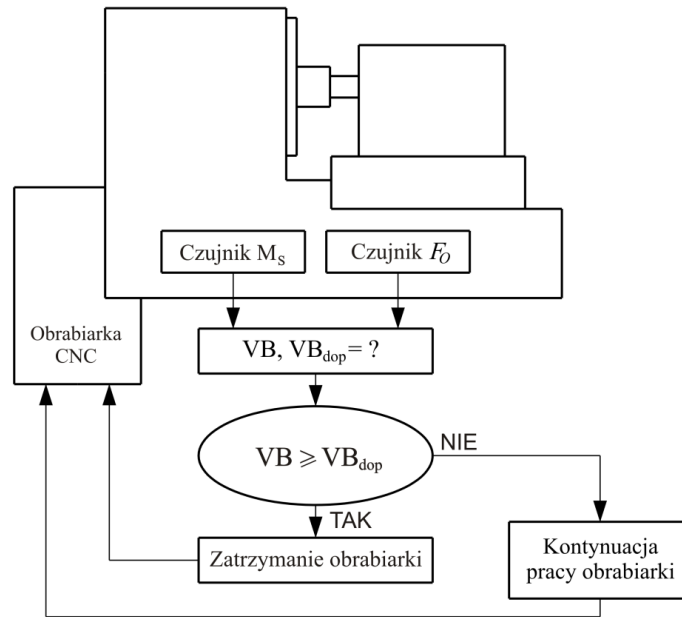
Obszerna charakterystyka problematyki wdrażania systemów monitorowania stanu i przebiegu procesów obróbkowych oraz metod przetwarzania sygnałów w przemyśle maszynowym została przedstawiona przez Teti i in. [136]. Gawlik [36] omówił przykłady technicznej realizacji układów diagnostyczno-nadzorujących stan narzędzi i przedmiotów obrabianych w procesie obróbki, opierając się na kontroli składowych siły skrawania, emisji akustycznej oraz momentu obrotowego.

6.2. Diagnozowanie stanu wiertel z oszczędnościowej stali szybko tnącej przy wierceniu żeliwa

Zużycie wierzchołków wiertła w pełni charakteryzuje zużycie i stan wiertła ze stali HS2-5-1 przy obróbce żeliwa [56]. Wielkość zużycia VB przyjęto jako kryterium stanu wiertła, a wartość dopuszczalnego zużycia VB_{dop} obliczoną według zależności (2.3) jako kryterium utraty zdolności skrawnej narzędzia. Badanie zmian funkcjonalnych parametrów procesu wiercenia w zależności od zmiany wartości parametru VB oraz analiza procesu diagnostyki narzędzia pozwoliły stwierdzić, że jako diagnostyczne cechy należy przyjmować składowe siły skrawania, których wartość znacznie się zwiększa wraz ze wzrostem zużycia narzędzia, co w przypadku wiertel powoduje wzrost siły osiowej P_O i momentu skrawania M_S . Ich wzrost określa się za pomocą dynamometrów wbudowanych w obrabiarkę lub przez pomiar faktycznego obciążenia według informacyjnej charakterystyki narzędzi obrabiarki, np. prądu twornika.

Podczas pomiaru obciążenia w napędach ruchu głównego i posuwu obrabiarki (rys. 6.1) sygnały od czujników momentu M_S i siły F_O są przesyłane do modułu, który po analizie wartości M_S i F_O określa aktualne zużycie wiertła. Po osiągnięciu wartości dopuszczalnego zużycia VB_{wdop} obliczonego dla założonych warunków skrawania z komputera zostaje przesłany sygnał do układu sterowania obrabiarki NC odnośnie wymiany zużytego narzędzia.

Jeśli narzędzie dla jednego przyjętego okresu trwałości obrabia części o różnej twardości i przy różnych parametrach skrawania, w pamięci komputera poza początkowymi wartościami M_S i F_O uzyskanymi przy pracy ostrym narzędziem powinny być również dostępne dane o wpływie na te wartości zmiennych parametrów procesu skrawania. Taka informacja może być przedstawiona na przykład w postaci modeli matematycznych. Aby uzyskać takie modele, badano związki między zużyciem VB_w i jego diagnostycznymi cechami M_S i F_O



Rys. 6.1. Algorytm diagnozowania stanu wiertel podczas obróbki stali, opracowano na podstawie [121]

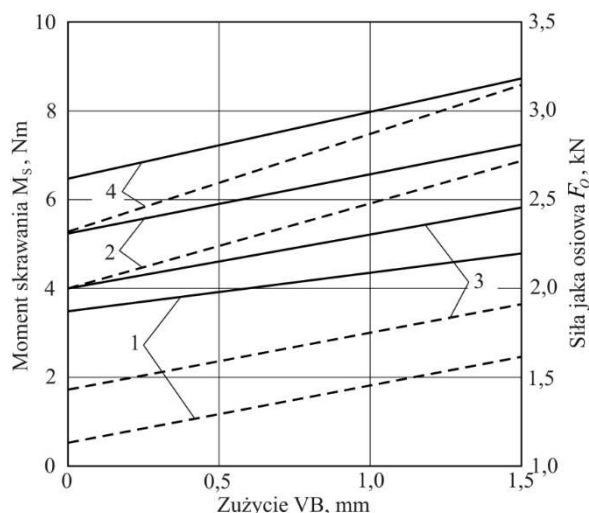
przy różnych parametrach wiercenia żeliwa o różnej twardości ($HB\ 100\div 200$). Badaniom poddano wiertła o średnicy $6\div 14$ przy różnych parametrach skrawania $v_c = 15\div 45$ m/min, $f = 0,1\div 0,43$ mm/obr. Wartość zużycia VB_w w trakcie badań doprowadziła do katastroficznego zużycia wiertła. Wartości momentu skrawania i siły osiowej określono za pomocą dynamometru zamocowanego na stanowisku badawczym. Sygnały od czujników opracowano metodą najmniejszych kwadratów. W całym zakresie wartości parametrów skrawania i twardości obrabianego materiału wpływ zużycia wiertła na wartość parametrów M_s i F_o (rys. 6.2) dostatecznie dokładnie opisują zależności liniowe.

Do opracowania modeli matematycznych stosujących podczas diagnozowania zużycia wiertel wartości M_s i P_o przyjmuje się dwuczłonowe zależności typu:

$$\left. \begin{aligned} M_s &= M_s^{VB=0} + \Delta M_s^{VB} \text{ [Nm]} \\ F_o &= F_o^{VB=0} + \Delta F_o^{VB} \text{ [N]} \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

gdzie: $M_s^{VB=0}$, $F_o^{VB=0}$ – wartości momentu skrawania [Nm] i siły osiowej [N] przy zużyciu $VB = 0$,

ΔM_s^{VB} , ΔF_o^{VB} – przyrost wartości momentu skrawania [Nm] i siły osiowej [N] przy określonym zużyciu VB .



Rys. 6.2. Zmiana wartości momentu skrawania M_S i siły osiowej F_O w zależności od zużycia VB podczas wiercenia wiertłem o średnicy 10 mm podczas obróbki żeliwa EN-GJS-400-15 o twardości HB 160 (linie 1 i 2) i HB 200 (linie 3 i 4) przy $v_c = 25$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr (linie 1 i 3) oraz $f = 0,2$ mm/obr (linie 2 i 4), opracowano na podstawie [121]

Z analizy równań (6.1) wynika, że stopnie wpływu posuwu i twardości żeliwa w pierwszej i drugiej składowej każdego równania są jednakowe. Ustalono także, że zużycie VB_w nie wykazuje znaczącego wpływu na stałe współczynniki. Na podstawie wartości parametrów obróbki przedstawionych na rys. 6.2 równania do obliczenia wartości momentu skrawania i siły osiowej można przedstawić w następującej postaci:

$$\left. \begin{aligned} M_S &= (0,174 + 0,4d^{-1} VB) \cdot d^2 f^{0,7} \cdot \left(\frac{HB}{190}\right)^{0,8} \quad [\text{Nm}] \\ F_O &= (700 + 0,1500 VB) \cdot d^2 f^{0,7} \cdot \left(\frac{HB}{190}\right)^{0,8} \quad [\text{N}] \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

Zależności układu (6.2) uwzględniające wpływ zużycia narzędzia na wartość momentu skrawania M_S i siły osiowej F_O różnią się od znanych formuł tym, że do stałego współczynnika dodaje się pewne składowe w zależności od zużycia VB_w i średnicy wiertła d . Należy zauważyć, że przy pracy ostrymi wiertłami praktycznie stałe współczynniki w równaniach układu (6.2) mogą się nieco różnić od wartości średnich dla całego okresu eksploatacji. Można to wyjaśnić indywidualną specyfiką każdego narzędzia, tj. chropowatością powierzchni natarcia i łysinek, błędami ostrzenia, wpływem odwrotnej stożkowatości itp.

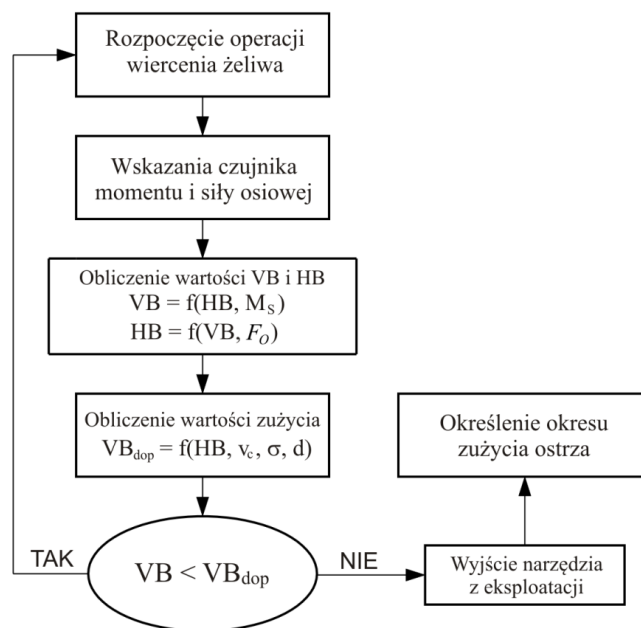
Aby zwiększyć dokładność diagnozowania wiertła, na podstawie wartości M_S i F_O działających w procesie obróbki stałe C_m i C_p należy określać eksperymentalnie dla każdego nowego wiertła przy obróbce pierwszego otworu. System diagnozowania powinien pracować w trybie samoczenia. W przypadku obróbki części o znanej twardości podczas wiercenia pierwszego otworu mierzy się wartość M_S i F_O , a następnie wylicza wartości poszukiwanych współczynników

na podstawie równań (6.2). Aby zdiagnozować zużycie wiertła, aktualną wartość VB_w wyznacza się z układu (6.2) na podstawie zarejestrowanych w strefie skrawania wartości M_S lub F_O . Dokładne określenie aktualnego zużycia przy założonych parametrach wiercenia jest jednak możliwe tylko wtedy, kiedy jest znana twardość obrabianego materiału. Badania pokazały, że różnice twardości partii odlewów w formach piaskowych dochodzą do 25%. Losowy charakter twardości może powodować znaczne obniżenie dokładności obliczeń M_S i F_O dla aktualnego zużycia wiertła. Aby wyeliminować znaczące błędy, stosuje się rozwiązanie układu równań (6.2) względem VB_w :

$$VB_w = \frac{C_m d F_O - C F_O M_S}{1500 d^{-1} M_S - 0,4 F_O} \quad (6.3)$$

Decyzję o utracie zdolności skrawnej narzędzia podejmuje się wtedy, kiedy aktualna wartość $VB_w \geq VB_{wdop}$. Możliwe jest także wyznaczenie wartości twardości żeliwa przy znanym zużyciu:

$$HB = \left[\frac{66,5 M_S}{(C_m + 0,4 d^{-1} VB_w) d^2 f^{0,7}} \right]^{1,25} \quad (6.4)$$



Rys. 6.3. Algorytm diagnozowania zużycia wiertła podczas obróbki żeliwa, opracowano na podstawie [121]

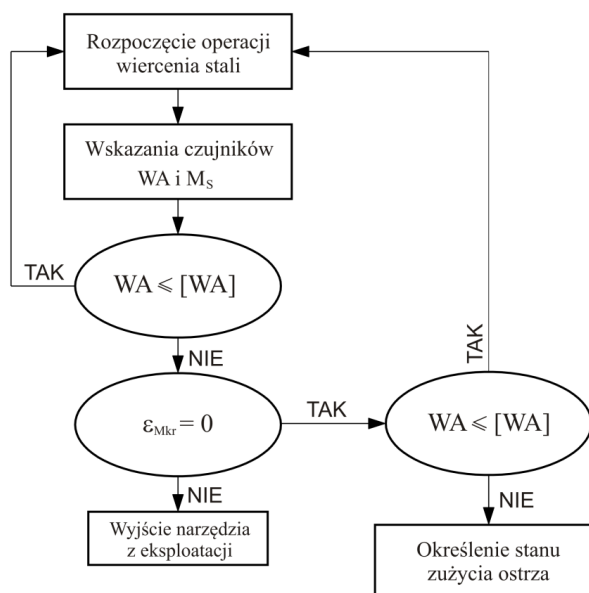
W rozpatrywanym przypadku wiercenia żeliwa uwzględniano dwa zmienne czynniki wymuszające oddziałujące na proces wiercenia, tj. zmieniające się aktualne zużycie VB_W i losową wartość twardości żeliwa. Aby określić aktualne zużycie, zastosowano dwa równania. W indywidualnym przypadku może jednak zachodzić konieczność uwzględnienia większej liczby parametrów. Wtedy do obliczenia aktualnego VB_W należy wykorzystać odpowiednio większą liczbę równań i diagnozowanie prowadzić według takiej samej liczby kontrolowanych parametrów. Strukturalny schemat algorytmu diagnozowania wiertel ze stali szybko tnącej przedstawiono na rys. 6.3.

6.3. Diagnozowanie stanu wiertel z oszczędnościowej stali szybko tnącej przy wierceniu stali

Jak pokazały badania przedstawione w podrozdziale 2.2, przy wierceniu stali konstrukcyjnych algorytm diagnozowania stanu wiertel powinien zasadniczo się różnić od przedstawionego na rys. 6.3 algorytmu odnoszącego się do obróbki żeliwa. Różnica jest spowodowana specyfiką rozwoju miejsc zużycia wiertel i przyczyną utraty zdolności skrawnej narzędzia podczas obróbki stali w porównaniu z wierceniem w żeliwie. Przykładowo, jako kryterium zużycia wiertła przy obróbce stali wykorzystuje się zużycie na głównej powierzchni położenia VB , a o charakterze cechy diagnostycznej zużycia decyduje wartość siły osiowej F_o . Podczas wiercenia aktualną wartość siły F_o mierzy się za pomocą dynamometru i porównuje z wartością założoną $F_o^{VB_{max}}$. Niekiedy, opierając się na badaniach eksperymentalnych, zakłada się wartość $F_o^{VB_{max}}$ równą 130% siły F_o występującej przy wierceniu wiertłem ostrym. Jak wskazuje doświadczenie, niezawodność takich systemów diagnostyki jest niewielka, nie wykorzystuje całego zakresu okresu trwałości wiertła lub możliwe jest wystąpienie nieoczekiwanych przyczyn wyjścia z eksploatacji narzędzia przy wartościach $F_o < F_o^{VB_{max}}$. Można to wyjaśnić tym, że przy określonych wartościach zużycia VB wartość siły F_o zmienia się niejednoznacznie wraz ze wzrostem zużycia wiertła VB . Zależność $F_o = f(V_B)$ jest monotonicznie rosnąca i niezawodność diagnozowania niewiele się zwiększy, jeśli zastosujemy wiertła z korekcją ścina. W tym przypadku nie zapewni się wysokiej niezawodności diagnozowania, ponieważ wartość zużycia wiertła, przy którym następuje jego utrata zdolności skrawnej, jest określona losowym charakterem początkowych parametrów narzędzia i właściwości materiału obrabianego. Losowy charakter zmian siły F_o sprawia, że wartość siły, przy której następuje spełnienie kryterium utraty zdolności skrawnej dla każdego wiertła, może być mniejsze lub większe od wartości maksymalnej $F_o^{VB_{max}}$.

O charakterze kryterium utraty zdolności skrawnej decyduje przyjęta wartość zużycia VB będąca pośrednim wskaźnikiem utraty trwałości ostrza. Jak przedstawiono w podrozdziale 2.2, chociaż zużycie wiertła w okresie poprzedza-

jącym utratę zdolności skrawnej następuje głównie na promieniach powierzchni przyłożenia, procesy bezpośrednio prowadzące do katastroficznego zużycia zachodzą na pomocniczej powierzchni przyłożenia (łysince). Diagnostycznymi cechami tych procesów są sygnały emisji wibroakustycznej i momentu skrawania przypadającego na łysinki oraz całkowitego momentu skrawania. Zwiększenie ich wartości powoduje zmiany procesów styku na łysinkach, skutkując zwiększeniem nacisków od strony obrabianej powierzchni otworu w wyniku cieplej deformacji części. Technologiczny algorytm diagnozowania wiertel podczas wiercenia stali przedstawiono na rys. 6.4.



Rys. 6.4. Technologiczny algorytm diagnozowania wiertel podczas wiercenia stali, opracowano na podstawie [121]

Stan wiertel można określić na podstawie dwóch cech diagnostycznych, tj. wartości amplitudy sygnału wibroakustycznego oraz wartości momentu skrawania [53]. Wzrost wartości sygnału wibroakustycznego WA do wartości dopuszczalnej sygnału wibroakustycznego WA odpowiada dopuszczalnemu zużyciu wiertła i zapoczątkowaniu procesów na powierzchni łysinek prowadzących do katastroficznego zużycia. Początek katastroficznego zużycia charakteryzuje wzrost momentu skrawania M_S z określonym przyspieszeniem. Przedstawiony algorytm kontroli sygnału wibroakustycznego jest niezawodny dla warunku, zgodnie z którym wartość przyspieszenia jest równa zero, co pozwala zabezpieczyć system diagnozowania przed losowym wzrostem wartości sygnału wibroakustycznego. Zwiększa to niezawodność diagnozowania stanu zużycia wiertel.

Podsumowanie

Bardzo ważnym zagadnieniem eksploatacyjnym narzędzia jest prawidłowy dobór gatunków stali szybko tnącej do określonego typu obróbki skrawaniem. Dobór ten powinien być dokonany na podstawie znajomości warunków eksploatacji narzędzia, rodzaju obciążenia, maksymalnej temperatury w procesie skrawania itp. Narzędzia wykonane ze spiekanej niskostopowej stali szybko tnącej wykazują na ogół lepsze właściwości skrawne od narzędzi wykonanych ze stali wytwarzanej konwencjonalnie o tym samym składzie chemicznym. Mikrostruktura stali spiekanej po obróbce cieplnej jest złożona z drobnych równomiernie rozmieszczonych węglików w osnowie martenzytu, co sprawia, że stal ta charakteryzuje się większą odpornością na zużycie w porównaniu ze stalą wytwarzaną przez odlewanie.

Trwałość narzędzia jest scharakteryzowana całym okresem eksploatacji, uwzględniającym konieczność jego ostrzenia w celu zapewnienia stanu gotowości do wykonywanej pracy. Ewolucja stanu narzędzia następuje głównie wskutek zużycia jego powierzchni skrawających albo wykruszeń. Zmienia się jego geometria, jeden z parametrów procesu skrawania, a razem z nią podstawowe parametry tworzącego się wióra i warstwy wierzchniej obrabianej części.

Specyfika procesów obróbki skrawaniem sprawia, że podczas eksploatacji i jednoczesnej diagnostyki zużycia narzędzia bardzo trudno jest określić optymalny z ekonomicznego punktu widzenia moment wymiany narzędzia. W zależności od rozwiązywanego zadania i wymaganych środków stosowane są różne przyrządy pomiarowe składające się z czujników przekształcających diagnostyczne cechy stanu narzędzia, czujników oraz urządzeń do zbierania i obróbki informacji oraz urządzeń pomiarowych. Aby zapewnić niezawodność diagnozowania, konieczne jest przede wszystkim zbadanie stanu narzędzia w konkretnych warunkach jego eksploatacji i określenie, który zmieniający się wskaźnik może służyć za kryterium oceny narzędzia. Jako kryterium stanu przyjmuje się dowolny z wymiarów miejsca zużycia, wykruszenia lub wielkość narostu zależną od zużycia powierzchni natarcia. Dopuszczalną wartość tych wymiarów, przy których rozpoczyna się katastroficzne zużycie części skrawającej narzędzia, ustala się indywidualnie, naruszając często określone w dokumentacji technologicznej wymagania dotyczące obróbki decydujące o kryterium utraty zdolności skrawnej narzędzia.

Wybór kryterium oceny stanu i utraty zdolności skrawnych narzędzia przedstawiono na przykładzie wiertel i frezów podczas obróbki żeliwa i stali konstrukcyjnej. Podczas obróbki żeliwa wskutek zużycia adhezyjno-ściernego miejsce zużycia rozwija się na powierzchniach przyłożenia. Wzdłuż głównej

krawędzi skrawającej szerokość bruzdy zużycia wzrasta wraz z przybliżeniem się do wierzchołków wiertła. Maksymalna wartość zużycia wiertła występuje w miejscu przecięcia głównej powierzchni przyłożenia z powierzchnią łysinki. Rozwój zużycia ostrza w tym miejscu prowadzi do katastroficznego zużycia wiertła. W tym czasie na powierzchni natarcia i na przejściowej krawędzi skrawającej zużycie praktycznie nie występuje. Ponieważ podczas obróbki żeliwa dominującym miejscem zużycia jest obszar na zewnętrznej powierzchni wiertła, wiertła ze stali szybkoobrotowej podczas wiercenia otworów w stali konstrukcyjnej zużywają się przede wszystkim na głównych powierzchniach przyłożenia. W okresie przyspieszonego zużycia najszybciej zużywa się poprzeczna krawędź skrawająca. Specyfika zużycia wiertel podczas obróbki stali konstrukcyjnych polega na tym, że w procesie skrawania zużycie następuje przede wszystkim na głównych powierzchniach przyłożenia, a utrata zdolności skrawnej narzędzia jest skutkiem katastroficznego zużycia i związanego z tym pełnego cieplnego zniszczenia na pomocniczych powierzchniach przyłożenia. Należy pokreślić, że katastroficzne zużycie narzędzia ze stali szybkoobrotowej jest związane ze wzrostem temperatury w ostrzu skrawającym do wartości powodujących zmiany właściwości materiału narzędzia. W przypadku wiertel przy określonej specyfice ich zużycia temperatura może wzrosnąć tylko wskutek wzrostu mocy źródła ciepła na głównych powierzchniach przyłożenia. Porównanie specyfiki zużycia wiertła ze stali szybkoobrotowej podczas obróbki żeliwa i stali powoduje, że podejście do diagnozowania stanu narzędzia w każdym przypadku powinno być różne.

Procesowi skrawania towarzyszą drgania o różnej częstotliwości, amplitudzie i intensywności, które mogą być stosowane do diagnostyki stanu narzędzia i procesu skrawania. Podstawowym celem diagnostyki procesu skrawania jest określenie właściwego okresu trwałości narzędzia, momentu jego utraty zdolności skrawnej w celu wymiany i tym samym przywrócenia stanu jego zdolności w automatycznym systemie wytwarzania na liniach obróbkowych oraz określenie aktualnego jego stanu w celu sterowania procesem skrawania. Systemy diagnozowania stanu narzędzia powinny realizować następujące procedury:

- pomiar parametrów cech diagnostycznych stanu aktualnego i stanu utraty jego zdolności skrawnych,
- rozpoznanie aktualnego stanu narzędzia i jego niezdatności,
- podjęcia decyzji dotyczącej jego wymiany albo sterowania procesem technologicznym.

W monografii scharakteryzowano automatyczne stanowiska do diagnozowania stanu narzędzia i procesu skrawania, uwzględniając jednoparametryczne i wieloparametryczne kryteria diagnostyczne. Przedstawiono charakterystykę oraz wyszczególniono wady i zalety czujników parametrów siłowych oraz akustyczno-emisyjnych czujników drgań występujących w procesach obróbki skrawaniem.

Zniszczenie ostrza jest skutkiem sił działających na skrawającą część narzędzia. W związku z tym siła powinna być informacyjną diagnostyczną cechą

zniszczenia. Większość stosowanych w praktyce algorytmów diagnostycznych zniszczenia i zużycia jest więc opartych na wykorzystaniu siły skrawania jako diagnostycznej cechy stanu niezdolności narzędzia. Proces rozpoznawania utraty zdolności skrawnej narzędzia sprowadza się do ustalenia momentu przekroczenia przez mierzony parametr dopuszczalnej wartości ustalonej na etapie uczenia systemów diagnostyki. Zaletą takich systemów diagnostyki jest prostota realizacji i minimalny czas wypracowania decyzji o utracie zdolności skrawnych narzędzia. W ten sposób eliminuje się konieczność uwzględnienia wartości czynników procesu skrawania. Podczas ich zmiany zachodzi jednak konieczność przeprowadzenia od nowa uczenia systemu w celu ustalenia wartości mierzonych parametrów odpowiadających stanowi niezdatności. Oprócz tego eliminuje się konieczność określenia aktualnego kryterium stanu narzędzia, np. wartości zużycia na powierzchni przyłożenia. Utrudnia to efektywną eksploatację narzędzia przy zmieniającym się okresie założonego czasu trwałości w warunkach skrawania, co jest typowe dla produkcji małoseryjnej.

Rozpatrzone przykłady poszukiwania specyfiki zużycia narzędzia podczas wiercenia i frezowania oraz przyczyn utraty zdolności skrawnej narzędzia i kryterium jego stanu prowadzi do wniosku, że podczas opracowania systemów diagnostyki nie zawsze wystarcza kierowanie się tylko znanymi z teorii skrawania zasadami powstawania miejsc zużycia, które zależą od indywidualnej specyfiki każdego procesu obróbki skrawaniem. W systemach diagnostycznych oprócz rozpatrywania przyczyn utraty zdolności skrawnej narzędzia wskutek zużycia należy również uwzględniać przyczyny powstające na skutek wykruszenia.

Literatura

- [1] Antić A., Hodolič J., Soković M.: Development of an intelligent system for tool wear monitoring applying neural networks. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 2006, 14, 146-151.
- [2] Axial and Radial Measuring Dowel. Prometec, Aachen, Germany.
- [3] Baldan A., Cuppini D., D'errico G., Rutelli G.: Tool wear monitoring based on cutting power measurement. *Wear* 1990, 139, 303-311.
- [4] Bartoszek M.: Numeryczne modelowanie rozptyłu ciepła w strefie skrawania dla stali C45. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej* 2013, 62, 79-88.
- [5] Baszura C.: Komputerowe systemy diagnostyki akustycznej. WNT, Warszawa 1996.
- [6] Blum T., Suzuki I., Inasaki I.: Development of a condition monitoring system for cutting tools using an acoustic emission sensor. *Bulletin of the Japanese Society of Precision Engineering* 1988, 22, 301-308.
- [7] Bobrov V.F.: Osnovy teorii rezaniya metallov. Mashinostroenie, Moskva 1975.
- [8] Bombiński S., Jemielniak K.: Ocena przydatności miar sygnałów w diagnostyce zużycia ostrza. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 2005, 25, 201-210.
- [9] Brodowicz W., Grzegórski Z.: *Technologia budowy maszyn*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1993.
- [10] Bucior J.: *Podstawy teorii i inżynierii niezawodności*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.
- [11] Byrne G., O'Donnell G.E.: An integrated force sensor solution for process monitoring of drilling operations. *CIRP Annals* 2007, 56, 89-92.
- [12] Byrne G., Dornfeld D., Inasaki I., Kettleler G., Teti R.: Tool condition monitoring (TCM). The status of research and industrial applications. *Annals of CIRP* 1995, 44, 541-567.
- [13] Cempel C.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. PWN, Warszawa 1989
- [14] Cempel C.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. WNT, Warszawa 1982.
- [15] Cempel C.: *Wibroakustyka stosowana*. PWN, Warszawa 1989.
- [16] Chan C.L., Chandra A.: A boundary element method analysis of the thermal aspects of metal cutting processes. *Journal of Engineering for Industry* 1991, 113, 311-319.
- [17] Chen X., Li B.: Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2007, 33, 968-976.
- [18] Choudhury S.K., Ramesh S.: On line tool wear sensing and compensation in turning. *Journal of Materials Processing Technology* 1995, 49, 247-254.

- [19] Cichosz P.: Narzędzia skrawające. WNT, Warszawa 2006.
- [20] Ciecianiak S., Karbowski K.: Nadzorowanie procesu wiercenia głębokich otworów. *Inżynieria Maszyn* 2010, 15, 82-91.
- [21] Coelho G.C., Golczewski J.A., Fischmeister H.F.: Thermodynamic calculations for Nb-containing high-speed steels and white-cast-iron alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A* 2003, 34A, 1749-1750.
- [22] Czechowski K., Profeska-Filip I., Fedaczyński A.: PVD coatings on ceramic materials cutting inserted. *Surface Engineering* 2005, 2, 19-24.
- [23] Czyszpak T.: Przykład zastosowania wnioskowania Takagi-Sugeno w diagnostyce narzędzi skrawających. *Eksploatacja i Niezawodność* 2004, 2, 9-12.
- [24] Czyżewski P., Moszczyński L., Osowski S., Markiewicz T.: Ocena stanu stempla w procesie wykrawania. *Mechanik* 2009, 68, 30-33.
- [25] Dimla Sr. D.E., Lister P.M.: On-line metal cutting tool condition monitoring. Part I: Force and vibration analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2000, 40, 739-768.
- [26] Dobrzański L.A.: Podstawy kształtowania struktury i własności materiałów metalowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
- [27] Dobrzański L.A.: Structure and properties of high-speed steels. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
- [28] Dobrzański L.A.: Wpływ krzemu na strukturę i własności stali szybko tnących wolframowo-wanadowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika* 1989, 96, s. 1-78.
- [29] Dolinšek S.: Work-hardening in the drilling of austenitic stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology* 2003, 133, 63-70.
- [30] Du E., Lovell M.R., Wu T.W.: Boundary element method analysis of temperature fields in coated cutting tools. *International Journal of Solids and Structures* 2001, 38, 4557-4570.
- [31] Dul-Korzyńska B.: Obróbka skrawaniem i narzędzia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.
- [32] Edneral A.F., Kirienko V.J., Filimonov V.F.: Effect of Titanium and Niobium on the properties of Tungsten-free high speed steel. *Russian Metallurgy* 1987, 4, 92-96.
- [33] Elbestawi M.A., Papazafiriou T.A., Du R.X.: In process monitoring of tool wear in milling using cutting force signature. *International Journal of Machine and Tools Manufacture* 1991, 31, 55-73.
- [34] El-Wardany T.I., Gao D., Elbestawi M.A.: Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 1996, 36, 687-711.
- [35] Falkowicz K., Kuczmaszewski J.: Powstawanie zadziórów przy frezowaniu współbieżnym i przeciwbieżnym stopu AlSi10Mg. *Mechanik* 2012, 71, 23-27.
- [36] Gawlik J.: Nadzorowanie systemów wytwarzania. *Inżynieria Maszyn* 2001, 6, 102-117.
- [37] Gawlik J.: Prognozowanie stanu zużycia ostrzy narzędzi w procesie skrawania. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1988.

- [38] Gómez M.P., Hey A.M., Ruzzante J.E., D'Attellis C.E.: Tool wear evaluation in drilling by acoustic emission. *Physics Procedia* 2010, 3, 819-825.
- [39] Grzesik W.: *Podstawy skrawania materiałów metalowych*. WNT, Warszawa 2010.
- [40] Grzesik W., Niesłony P.: FEM-based thermal modeling of the cutting process using power law-temperature dependent concept. *Archives of Materials Science and Engineering* 2008, 29, 105-108.
- [41] Grzesik W., Bartoszek M., Niesłony P.: Finite element modelling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools. 13th International Scientific Conference on Achievements in Mechanical and MAterials Engineering, Gliwice 16-19 May 2009, 259-262.
- [42] Heinemann R., Hinduja S., Barrow G.: Use of process signals for tool wear progression sensing in drilling small deep holes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2007, 33, 243-250.
- [43] Hoyle G.: *High speed steels*. Butterworth & Co. Cambridge 1988.
- [44] Huang B.W., Kuang J.H., Yu P.P.: Effect of crack on drilling vibration. *Journal of Sound and Vibration* 2009, 322, 1100-1116.
- [45] International Standard ISO 13715:2000. Technical drawings – Edges of undefined shape – Vocabulary and indications.
- [46] Jacobson S., Wallen P.: A new classification system for dead zones in metal cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 1988, 28, 529-538.
- [47] Jaworski J.: Application possibility of tools made of low-alloy high-speed steels in the planned housing. *Archives of Foundry Engineering* 2006, 6, 413-424.
- [48] Jaworski J.: Influence of parameters of machine cutting drills durability in a line of frame casting. *Archives of Foundry Engineering* 2009, 9, 195-198.
- [49] Jaworski J.: Influence of TiN coating on criterion of wearing drills in a line of frame casting. *Archives of Foundry Engineering* 2010, 10, 387-390.
- [50] Jaworski J.: Opredelenie kriteriya sostoyaniya sferi iz izkolegirovannoi bystro-rezushchej stali. *Archives of Foundry Engineering* 2008, 8, 159-162.
- [51] Jaworski J.: Tendencje rozwoju materiałów narzędzi skrawających. *Przegląd Mechaniczny* 2005, 11, 33-36.
- [52] Jaworski J., Kluz R.: Badanie zużycia wiertel z niskostopowej stali szybkoobrotowej HS 2-5-1. *Mechanik* 2012, 8-9 (CD).
- [53] Jaworski J., Kluz R.: Wykorzystanie sygnału wibroakustycznego do diagnozowania stanu wiertel ze stali HS2-5-1 przy wierceniu stali konstrukcyjnych. IX Konferencja Szkoły Obróbki Skrawaniem, Kielce–Sandomierz, 23-25 wrzesień 2015 r.
- [54] Jaworski J., Trzepieciński T.: *Możliwości zapewnienia jakościowego wykonania narzędzi z oszczędnościowej stali szybkoobrotowej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2014.
- [55] Jaworski J., Trzepieciński T.: *Stal stosowana na narzędzia do przeróbki plastycznej metali*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2014.
- [56] Jaworski J., Kluz R., Trzepieciński T.: Wpływ parametrów obróbki na miejsce powstawania zużycia i intensywność procesu zużywania wiertel. *Tribologia* 2014, 45, 81-90.

- [57] Jemielniak K.: Automatyczna diagnostyka ostrzy narzędzi skrawających. *Inżynieria Maszyn* 2012, 17, 17-29.
- [58] Jemielniak K.: Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawaniem. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 2002.
- [59] Jemielniak K.: Commercial tool condition monitoring systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 1999, 15, 711-721.
- [60] Jemielniak K.: Przemysłowe układy diagnostyki stanu narzędzia i procesu skrawania. *Mechanik* 1998, 71, 625-631.
- [61] Jemielniak K.: Tendencje rozwojowe w diagnostyce stanu narzędzia i procesu skrawania. *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń* 1997, 21, 43-55.
- [62] Jemielniak K.: Tool wear monitoring based on a non-monotonic signal feature. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture* 2006, 220, 163-170.
- [63] Jemielniak K., Otman O.: Catastrophic tool failure detection based on acoustic emission signal analysis. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 1998, 47, 31-34.
- [64] Jemielniak K., Kwiatkowski L., Wrzosek P.: Diagnostyka zużycia ostrza oparta na pomiarach sił skrawania i emisji akustycznej jako wejściach do sztucznej sieci neuronowej. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Seria Konferencje* 1996, 11, 63-73.
- [65] Juneja B.L., Sekhon G.S., Seth N.: *Fundamentals of metal cutting and machine tools*. New Age International, New Delhi 2003.
- [66] Jurko J., Berdis A., Gecák J., Nemcova J.: Study of changes the tool wear of the cutting tool part of a cast iron GTW 35-04 while drilling. *Applied Mechanics and Materials* 2013, 404, 82-85.
- [67] Jurkovic J., Korosec M., Kopac J.: New approach in tool wear measuring technique using CCD vision system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2005, 45, 1023-1030.
- [68] Józwick J., Domińczuk J.: Analiza eksperymentalna zjawiska tworzenia narostu podczas toczenia. *Eksplatacja i Niezawodność* 2001, 5, 53-57.
- [69] Kalpakjian S.: *Manufacturing processes for engineering materials*. Addison-Wesley, Reading 1991.
- [70] Kannatey-Asibu E., Dornfeld D.A.: A study of tool wear using statistical analysis of metal cutting acoustic emission. *Wear* 1982, 78, 247-261.
- [71] Kettler G.: Influence of monitoring system which affect their reliability. *Proceedings of the 2th International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*. Leuven, Belgium 1999, 768-777.
- [72] Kilickap E.: Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method while drilling of GFRP composite. *Expert Systems with Applications* 2010, 37, 6116-6122.
- [73] Kim D.W., Lee Y.S., Park M.S., Chu C.N.: Tool life improvement by peck drilling and thrust force monitoring during deep-micro-hole drilling of steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2009, 49, 246-255.

- [74] Kirchheim A., Zanetti M.: Reliable monitoring for turning operations. Force sensor with integrated electronics measures forces in three directions. *Sensor Review* 1999, 19, 192-196.
- [75] Ko S.L., Dornfeld D.A.: A study on burr formation mechanism. *Transactions of the ASME Journal of Engineering Materials and Technology* 1991, 113, 75-87.
- [76] Köning W., Ketteler G.: Research on tool condition monitoring in Europe. State of the art and future prospects. *Proceedings of Third Meeting of the CIRP Working Group on TMC, Paris 1994*, 8-29.
- [77] Krawiarz J., Mazur A.: High-speed steel for precise casted tools. *Inżynieria Materiałowa* 2001, 4, 477-480.
- [78] Królczyk G., Gajek M., Legutko S.: Predicting the tool life in the dry machining of duplex stainless steel. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013, 15, 62-65.
- [79] Królczyk G.M., Niesłony P., Legutko S.: Determination of tool life and research wear while duplex stainless steel turning. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2015, 15, 347-354.
- [80] Kuczmazewski J.: Efektywność wytwarzania elementów lotniczych ze stopów aluminium i magnezu [w:] *Komputerowo zintegrowane zarządzanie*, R. Knosala (red.). Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2011, 7-18.
- [81] Kuczmazewski J., Pieško P.: Wear of milling cutters resulting from high silicon aluminium alloy cast AlSi21CuNi machining. *Eksploatacja i Niezawodność* 2014, 16, 37-41.
- [82] Liang S., Dornfeld D.: Tool wear detection using time series analysis of acoustic emission. *Journal of Engineering for Industry* 1989, 111, 199-205.
- [83] Lin S.C., Yang R.J.: Force – based model for tool wear monitoring in face milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 1995, 35, 1201-1211.
- [84] Lipski J.: *Diagnostyka procesów wytwarzania*. TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak, Lublin 2013.
- [85] Lipski J.: Nadzorowanie procesów skrawania metodami analizy cyfrowej sygnału wibroakustycznego. *Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej* 1992, 225.
- [86] Lipski J., Zaleski K.: Zastosowanie sieci neuronowych w systemach diagnostycznych narzędzi skrawających. *Przegląd Mechaniczny* 2005, 64, 225-228.
- [87] Liu H.S., Lee B.Y., Tarn Y.S.: In-process prediction of corner wear in drilling operations. *Journal of Materials Processing Technology* 2000, 101, 152-158.
- [88] Lu M.C., Saibu E.K.: Analysis of sound signal characteristics associated with adhesive wear in machining. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME. North American Manufacturing Research Conference (NAMRC XXVIII)*. Lexington, USA 2000, 257-262.
- [89] Madej M.: *Kształtowanie struktury i własności infiltrowanych kompozytów na podstawie stali szybko tnącej*. Kraków 2007 (praca niepublikowana).
- [90] Marciniak Z.: *Konstrukcja wykrojników*. Ośrodek Techniczny A. Marciniak, Warszawa 2002.
- [91] *Materiały reklamowe firmy Kistler Instrumente AG Winterthur. CH-8408 Winterthur, Switzerland.*

- [92] Materiały reklamowe firmy Montronix, www.montronix.com (dostęp: 12.05.2014).
- [93] Materiały reklamowe firmy Nordmann, www.nordmann.info (dostęp: 12.05.2014).
- [94] Matula G.: Gradientowe warstwy powierzchniowe z węglkostali narzędziowych formowane beziśnieniowo i spiekane. *Open Access Library* 2012, 7, 1-144.
- [95] Matuszak J.: Powstawanie i usuwanie zadziorów w obróbce skrawaniem. www.rsi2004.lubelskie.pl/doc/sty6/art/Matuszak_art.pdf (dostęp: 09.08.2015).
- [96] Meena A., El Mansori M.: Drilling performance of green austempered ductile iron (ADI) grade produced by novel manufacturing technology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2012, 59, 9-19.
- [97] Migdalski J.: Podstawy strukturalnej teorii niezawodności. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1978.
- [98] Miller S.F., Blau P.J., Shih A.J.: Tool wear in friction drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2007, 47, 1636-1645.
- [99] Moriwaki T.: Detection of cutting tool fracture by acoustic emission measurement. *Annals CIRP* 1980, 29, 35-40.
- [100] MTC Tool and Process Monitoring. Artis, Ann Arbor, USA 1997.
- [101] Nordmann Sensor Technology. Nordmann Köln, Germany 1997.
- [102] Nowakowski T.: Metodyka wyznaczania niezawodności obiektów mechanicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [103] Ohzeki H., Suda I., Mashine A.: Monitoring of tool failure in drilling by utilizing magnetostrictive torque sensor. *Proceedings of the 2nd International Workshop of Intelligent Manufacturing Systems*. Leuven, Belgium 1999, 787-794.
- [104] Olszak W.: Obróbka skrawaniem. WNT, Warszawa 2009.
- [105] Pan F., Hirohashi M., Lu Y., Ding P., Tang A., Edmonds D.V.: Carbides in high-speed steels containing silicon. *Metallurgical and Materials Transactions A* 2004, 35A, 2757-2766.
- [106] Pancielejko M.: Analiza mechanizmów zużycia wiertel ze stali HS6-5-2 z powłokami Ti(C,N) wytworzonymi metodą PVD, po badaniach eksploatacyjnych. *Inżynieria Materiałowa* 2010, 31, 1147-1152.
- [107] Power Sensor PS60 and Power Monitor PM 60. Prometec. Aachen, Germany 2010.
- [108] Power Sensor Montronix. Montronix, Ann Arbor, USA 2011.
- [109] Przystacki D., Jankowiak M.: Surface roughness analysis after laser assisted machining of hard to cut materials. *Journal of Physics, Conference Series* 2014, 483, 12-19.
- [110] Przybylski L.: Strategia doboru warunków obróbki współczesnymi narzędziami. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2000.
- [111] Rangwala S., Dornfeld D.: A study of acoustic emission generated during orthogonal metal cutting. Part 1: Energy analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 1991, 33, 471-487.
- [112] Ravindra H.V., Srinivasa Y.G., Krishnamurthy R.: Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. *Wear* 1997, 212, 78-84.

- [113] Richter J.: Tribological evaluation of high-speed steels with a regulated carbide chase. *Materials Characterization* 2003, 50, 339-347.
- [114] Riedl R., Karagöz S., Fischmeister H.: Solidification morphology of primary carbides in niobium-alloyed S 6-5-2 type high-speed steels. *Zeitschrift für Metallkunde* 1983, 74/4, 199-205.
- [115] Riedl R., Karagöz S., Fischmeister H., Jeglitsch F.: Developments in high speed tool steels. *Steel Research* 1987, 58, 339-352.
- [116] Schäfer F.: *Entgraten*. Krausskopfverlag, Mainz 1975.
- [117] Selek M., Tasmedir S., Dincer K., Baskaya S.: Experimental examination of the cooling performance of Ranque-Hilsch vortex tube on the cutting tool nose point of the turret lathe through infrared thermography method. *International Journal of Refrigeration* 2011, 34, 807-815.
- [118] Semotiuk L.: An analysis of the operational characteristics of innovative tool structures used in high speed rough milling processes. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009, 11, 46-53.
- [119] Shahabi H.H., Ratnam M.M.: In-cycle monitoring of tool nose wear and surface roughness of turned parts using machine vision. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2009, 40, 1148-1157.
- [120] Shahabi H.H., Low T.H., Ratnam M. M.: Notch wear detection in cutting tools using gradient approach and polynomial fitting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2009, 40, 1057-1066.
- [121] Sinopalnikov V.A., Eremenko I.V.: *Diagnostika procesa rezaniya i instrumenta*. Nacionalnyi Standoinstrumentalny Universitet, Moskva 1991.
- [122] Sinopalnikov W.A., Grigoriev S.N.: *Reliability and diagnosis of technological systems*. MGU Stankin, Moscow 2003.
- [123] Skorulski G.: Platforma pomiarowa do wyznaczania oporów skrawania. *Aparatura Badawcza i Dydaktyczna* 2014, 2, 155-162.
- [124] Smith A.J.R., Armarego E.J.A.: Temperature prediction in orthogonal cutting with a finite difference approach. *Annals of the CIRP* 1981, 9-13.
- [125] Sokołowski A., Czyszpak T.: *Systemy logiki rozmytej – struktura i konstruowanie*. Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn 2003, 1, 55-66.
- [126] Starkov W.K.: *Machining. Controlling of stability and quality systems in automated company*. Maszynostrojenie, Moscow 1989.
- [127] Stephenson D.A., Agapiou J.S.: *Metal cutting theory and practice*. Taylor & Francis Group, Suite 2006.
- [128] Storch B.: *Podstawy obróbki skrawaniem*. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001.
- [129] Stós J.: *Obróbka skrawaniem w praktyce. Poradnik inżyniera, konstruktora i mechanika*. Verlag Dashöfer, Warszawa 2008.
- [130] Su J.C., Huang C.K., Tarn Y.S.: An automated flank wear measurement of microdrills using machine vision. *Journal of Materials Processing Technology* 2006, 180, 328-335.

- [131] Sun J., Hong G.S.: Effective training data selection in tool condition monitoring system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2006, 46, 218-224.
- [132] Susanto V., Chen J.C.: Fuzzy logic based in-process tool-wear monitoring system in face millin operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2003, 3, 186-192.
- [133] Sutowski P., Plichta S.: Zastosowania metody pomiaru emisji akustycznej w ocenie procesów obróbkowych. *Przegląd Mechaniczny* 2006, 65, 20-25.
- [134] Szafarczyk M., Chrzanowski J., Gościński R.: Nowoczesne metody monitorowania zużycia ostrzy narzędzi. Konferencja „Innowacje w budowie maszyn”. Poznań, 20 czerwiec 2006.
- [135] Šuštaršič B., KOsec L., Dolinšek S., Podgornik B.: The characteristics of vacuum sintered M3/2 type HSSs with MoS₂ addition. *Journal of Materials Processing Technology* 2003, 98-104, 143-144.
- [136] Teti R., Jemielniak K., O'Donnell G., Dornfeld D.: Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Annals* 2010, 59, 717-739.
- [137] Tonshoff H.K., Brinksmeier E., Husen H.: Berührungslose messung des dynamischen bearbeitungsmoments zur überwachung schlanker rotierender werrzeuge. *Elektrotechnik und Informationstechnik* 1991, 108, 252-257.
- [138] Trent E.M.: *Metal cutting*. Butterworths, London 1989.
- [139] Twardowski P., Legutko S., Krolczyk G.M., Hloch S.: Investigation of wear and tool life of coated carbide and cubic boron nitride cutting tools in high speed milling. *Advances in Mechanical Engineering* 2015, 7, 1-9.
- [140] Ulutan U., Lazoglu I., Dinc C.: Three-dimensional temperature predictions in machining process using finite difference method. *Journal of Materials Processing Technology* 2009, 209, 1111-1121.
- [141] Vilcek I., Madl J.: Monitoring of tool condition in drilling. *Advanced Manufacturing Science and Technology* 2003, 27, 25-32.
- [142] Wang G., Cui Y.: On line tool wear monitoring based on auto associate neural network. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2013, 24, 1085-1094.
- [143] Wang W.H., Wong Y.S., Hong G.S.: 3D measurement of crater wear by phase shifting method. *Wear* 2006, 261, 164-171.
- [144] Wartacz A., Świć A., Zubrzycki J.: Zużycie ostrza narzędzia, a zmiana parametrów toczenia w kolejnych zabiegach. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2004, 4, 58-61.
- [145] Wieczorowski K., Matuszak A.: Wpływ zużycia wiertła na dokładność wiercenia głębokich otworów. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 1997, 17, 67-71.
- [146] Wieczorowski K., Siecla R.: Badania zużycia wiertel z wymiennymi płytkami do wiercenia głębokich otworów. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 2009, 29, 149-157.
- [147] Wittbrodt P.: Logika rozmyta w systemie wspomaganie decyzji w procesie obróbki skrawaniem. Konferencja Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji. Zakopane, 1-3 marzec 2015 r., 764-773.

- [148] www.rsi2004.lubelskie.pl/doc/sty5/art/Weremczuk_A_art.pdf (dostęp: 29.07.2015).
- [149] www.zmp.wm.tu.koszalin.pl/body/download/skrypt_got.pdf (dostęp: 29.07.2015).
- [150] Wysiecki M.: Nowoczesne materiały narzędziowe. WNT, Warszawa 1997.
- [151] Yan J., Murakami Y., Davim J.P.: Tool design, tool wear and tool life, [in:] Machining dynamics. Fundamentals, applications and practices. K. Cheng (ed.). Springer-Verlag, London 2009, 117-149.
- [152] Yao Y., Li X., Yuan Z.: Tool wear detection with fuzzy classification and wavelet fuzzy neural network. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 1999, 39, 1525-1538.
- [153] Yumak O., Ertunc H.M.: Tool wear condition monitoring in drilling processes using fuzzy logic. *Neural Information Processing 2006*, 4234, 508-517.
- [154] Zabel A., Heilmann M.: Deep hole drilling using tools with small diameters process analysis and process design. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2012, 61, 111-114.
- [155] Zheng X., Zhang H., Xue K., Chen M., Zhang Y.: Optimization of twist drill's geometry for cast iron. *Key Engineering Materials* 2010, 431-432, 555-558.
- [156] Zoriktuev V.T., Nikitin Y.A., Sidorov A.S.: Monitoring and prediction of cutting-tool wear. *Russian Engineering Research* 2008, 28, 88-91.
- [157] Żaczek J., Bombiński S.: Wizyjny system diagnostyki stanu ostrza przy toczeniu. *Inżynieria Maszyn* 2012, 17, 30-41.

Spis rysunków i tabel

Rys. 1.1. Przebieg przypadkowych funkcji zużycia powierzchni przyłożenia ostrza $VB = f(t)$ i rozkład normalny trwałości przy dopuszczalnej wartości zużycia [54]	12
Rys. 1.2. Struktura środków kontroli i diagnozowania	14
Rys. 1.3. Wzajemny związek między parametrami stanu narzędzia i parametrami procesu skrawania: A – amplituda drgań, EA – emisja akustyczna, ω – częstotliwość kątowna drgań, R – siła skrawania, SED – siła elektrodynamiczna, Q_N – źródło ciepła, T – temperatura, opracowano na podstawie [121]	15
Rys. 1.4. Naukowo-metodyczne podstawy prac diagnozowania procesu wiercenia, opracowano na podstawie [121]	18
Rys. 2.1. Przyczyny, postacie i objawy zużycia ostrzy, opracowano na podstawie [31]	22
Rys. 2.2. Miejsca zużycia kontrolowane podczas badań trwałości wiertła przy obróbce stali żeliwa EN-GJS-500-7: VB – zużycie powierzchni przyłożenia ostrza wiertła, VB_t – zużycie powierzchni przyłożenia łysinki, VB_W – zużycie wierzchołka, VB_{WO} – zużycie powierzchni przyłożenia wierzchołka, opracowano na podstawie [52]	27
Rys. 2.3. Dynamika zużycia kontrolowanych miejsc wiertła dla $v_c = 20$ m/min, $f = 0,3$ mm/obr przy obróbce żeliwa EN-GJS-500-7 [48]	28
Rys. 2.4. Dynamika zużycia kontrolowanych miejsc wiertła dla $v_c = 40$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr przy obróbce żeliwa EN-GJS-500-7 [48]	28
Rys. 2.5. Dynamika zużycia kontrolowanych miejsc wiertła dla $v_c = 20$ m/min, $f = 0,4$ mm/obr przy obróbce żeliwa EN-GJS-500-7 [50]	30
Rys. 2.6. Zależność temperatury T_{max} od zużycia wiertła dla prędkości skrawania: 1) $v_c = 40$ m/min, 2) $v_c = 30$ m/min, 3) $v_c = 25$ m/min, głębokość skrawania $a_p = 0,05$ mm (linia cienka), $a_p = 0,1$ mm (linia przerywana), $a_p = 0,2$ mm (linia pogrubiona), opracowano na podstawie [121]	31
Rys. 2.7. Model wiertła do pomiaru temperatury w punktach zewnętrznej średnicy wiertła: 1 – obudowa, 2 – płytki skrawające, 3 – oprawka, 4 – szczotka, 5 – termopary, opracowano na podstawie [121]	32
Rys. 2.8. Rozkład temperatury na powierzchni natarcia (1), na głównej powierzchni przyłożenia (2), wykres zmiany temperatury T wzdłuż głównej (3) i pomocniczej (4) krawędzi skrawającej, opracowano na podstawie [121]	33
Rys. 2.9. Rozkład temperatury na powierzchni natarcia wiertła (zużycie $VB = 1$ mm), wykresy zmiany temperatury wzdłuż głównej (1) i pomocniczej (3) krawędzi skrawającej i powierzchni zużycia wierzchołków (2), opracowano na podstawie [121]	35

Rys. 2.10. Zależność temperatury T_{\max} od zużycia wiertel przy prędkościach skrawania: 1) $v_c = 40$ m/min, 2) $v_c = 30$ m/min, 3) $v_c = 25$ m/min i posuwach $f = 0,05$ mm (linia pogrubiona), $f = 0,1$ mm (linia przerywana), $f = 0,2$ mm (linia kropkowana), opracowano na podstawie [121]	35
Rys. 2.11. Oczekiwane (linia przerywana) i obliczone (linia ciągła) wartości zużycia i temperatury ostrza w zależności od liczby wykonanych otworów, opracowano na podstawie [121]	36
Rys. 2.12. Miejsca zużycia kontrolowane podczas badań trwałości wiertel przy obróbce stali C45: VB_s – zużycie poprzecznej krawędzi skrawającej, VB – zużycie powierzchni przyłożenia ostrza wiertła, VB_t – zużycie powierzchni przyłożenia łysinki, opracowano na podstawie [56]	37
Rys. 2.13. Dynamika zużycia w kontrolowanych miejscach wiertła przy $v_c = 40$ m/min i $f = 0,06$ mm/obr podczas obróbki stali C45, opracowano na podstawie [56]	38
Rys. 2.14. Dynamika zużycia w kontrolowanych miejscach wiertła przy $v_c = 20$ m/min i $f = 0,2$ mm/obr podczas obróbki stali C45, opracowano na podstawie [56]	38
Rys. 2.15. Rozkład temperatury na powierzchni natarcia wiertła przy obróbce stali 45H; parametry skrawania $v_c = 28$ m/min, $f = 0,2$ mm/obr, opracowano na podstawie [121]	40
Rys. 2.16. Źródła ciepła i rozpraszanie ciepła w strefie skrawania, opracowano na podstawie [149]	41
Rys. 2.17. Zmiana procentowego rozkładu strumieni ciepłych, opracowano na podstawie [39]	41
Rys. 2.18. Pola wartości temperatury w obrabianej części: a) obliczone, b) zmierzone eksperymentalnie dla zużycia $VB = 0$ (linia przerywana), $VB = 0,3$ mm (linia ciągła); obrabiany materiał – stal C45, parametry skrawania $v_c = 28$ m/min, $f = 0,22$ mm/obr, opracowano na podstawie [121]	43
Rys. 2.19. Analizowany obszar rozkładu temperatury	43
Rys. 2.20. Próbkę do pomiarów oporów skrawania: a – odcinek skrawania głównymi krawędziami skrawającymi, b – odcinek skrawania głównymi krawędziami skrawającymi i łysinkami, c – odcinek skrawania wszystkimi krawędziami skrawającymi	44
Rys. 2.21. Zależność momentu skrawania od zużycia ostrza na powierzchni przyłożenia VB przypadającego na łysinki wiertła: 1) $v_c = 19,4$ m/min, $f = 0,22$ mm/obr, 2) $v_c = 27,7$ m/min, $f = 0,11$ mm/obr, 3) $v_c = 27,7$ m/min, $f = 0,16$ mm/obr, 4) $v_c = 38,5$ m/min, $f = 0,11$ mm/obr, opracowano na podstawie [121]	45
Rys. 2.22. Powierzchnie obrabiane frezem walcowo-czołowym i miejsca zużycia zęba, opracowano na podstawie [121]	46
Rys. 2.23. Krzywe zmian temperatury w ostrzu freza, opracowano na podstawie [121]	47
Rys. 3.1. Zmiana sił F_x , F_z wraz ze wzrostem zużycia VB : materiał obrabiany – stal molibdenowa, opracowano na podstawie [121]	51

Rys. 3.2. Zmiana amplitudy drgań siły w zależności od zużycia, opracowano na podstawie [121]	52
Rys. 3.3. Schemat sił działających na węzły i części tokarki: 1 – tensometryczne łożyska, 2, 3 – łożyska śrub pociągowych, 4, 5, – czujniki mocy napędów, 6 – czujnik wibroakustyczny, opracowano na podstawie [121]	53
Rys. 3.4. Powierzchniowy czujnik odkształceń elementów obrabiarki, opracowano na podstawie [58]	55
Rys. 3.5. Budowa czujnika odkształceń poprzecznych: 1 – czujnik siły, 2 – element kwarcowy, 3 – tulejka mocująca, opracowano na podstawie [58] ..	55
Rys. 3.6. Czujnik pomiarowy sił skrawania Kistler 9017C (a) wraz z elementami mocującymi (b), opracowano na podstawie [91]	56
Rys. 3.7. Płyta pomiarowa 9253B11 firmy Kistler, opracowano na podstawie [91]	56
Rys. 3.8. Sposób pomiaru sił skrawania za pomocą wnelki (a) oraz nastawnego klina, opracowano na podstawie [58]	57
Rys. 3.9. Odmiany siłomierzy tokarskich Kistler 9121, opracowano na podstawie [91]	58
Rys. 3.10. Czujnik pomiarowy składowych F_x , F_y , F_z siły skrawania i momentu obrotowego M_z Kistler 9123C, opracowano na podstawie [91]	58
Rys. 3.11. Wpływ obciążenia silnika na moc i natężenie prądu, opracowano na podstawie [108]	59
Rys. 3.12. Zakres stosowania czujników mocy, opracowano na podstawie [58]	60
Rys. 3.13. Zakłócenia wpływające na pracę czujnika mocy, opracowano na podstawie [71]	60
Rys. 3.14. Oprawka do gwintowania z czujnikiem parametrów siłowych: 1 – rotor, 2 – stator, 3 – oprawka, 4 – narzędzie, opracowano na podstawie [58]	61
Rys. 3.15. Magnetostrykcyjny czujnik momentu obrotowego: 1 – uchwyt, 2, 3 – cewki, 4 – ostrze, opracowano na podstawie [58]	62
Rys. 3.16. Wpływ wartości zużycia VB na amplitudę sygnału WA , opracowano na podstawie [121]	65
Rys. 3.17. Wpływ wartości zużycia VB na amplitudę sygnału emisji akustycznej, opracowano na podstawie [121]	66
Rys. 3.18. Zasada działania piezoelektrycznego czujnika akcelerometru: 1 – korpus czujnika, 2 – element piezoelektryczny, 3 – obciążnik, 4 – sprężyna, 5 – zespół pomiarowy	67
Rys. 3.19. Czujnik piezoelektryczny emisji akustycznej: 1 – piezoelement, 2 – podkładka, 3 – korpus, 4 – odbiornik prądu, 5 – przewód, 6 – tekstolitowa podkładka	68
Rys. 3.20. Czujniki pomiaru emisji akustycznej: a) SEA, b) RSA, c) BSA, opracowano na podstawie [93]	69
Rys. 3.21. Przemysłowy czujnik emisji akustycznej Kistler 8152B111, opracowano na podstawie [91]	69
Rys. 3.22. Czujnik emisji akustycznej typu SEH, opracowano na podstawie [93] ...	70
Rys. 3.23. Zespół pomiarowy sygnału wibroakustycznego	70
Rys. 3.24. Zmiana sygnału parametrów drgań, opracowano na podstawie [121]	71

Rys. 3.25. Wpływ zużycia powierzchni czołowej stempla na wysokość zadziorów na elementach wykrawanych, opracowano na podstawie [55]	74
Rys. 3.26. Schemat czujnika stykowego: 1 – korpus, 2 – podzespół kontrolny, 3 – końcówka pomiarowa, 4 – trzpień, 5 – element kontaktowy, 6 – urządzenie zabezpieczające, 7 – głowica pomiarowa, 8 – czujnik indukcyjny, 9 – układ zasilania i obróbki sygnałów, opracowano na podstawie [121]	75
Rys. 3.27. System pomiaru wymiarów obrabianej części i narzędzia: 1, 2 – głowice pomiarowe, opracowano na podstawie [121]	76
Rys. 4.1. Struktura i podstawowe elementy stanowiska ASDPSiN, opracowano na podstawie [121]	81
Rys. 4.2. Schemat wyposażenia frezarki w czujniki: 1 – dynamometr, 2 – czujnik wibracji, 3 – głowica do pomiaru sił, 4 – czujnik pomiaru siły elektrodynamicznej, opracowano na podstawie [121]	82
Rys. 4.3. Aparaturowa część stanowiska ASDPSiN, opracowano na podstawie [121]	82
Rys. 4.4. Schemat strukturalny stanowiska pomiarowego, opracowano na podstawie [121]	83
Rys. 4.5. Schemat zasadniczy urządzenia sprzęgającego, opracowano na podstawie [121]	84
Rys. 4.6. Struktura oprogramowania, opracowano na podstawie [121]	86
Rys. 4.7. Algorytm podprogramu HOLDHOLD, opracowano na podstawie [121]	87
Rys. 4.8. Algorytm podprogramu START, opracowano na podstawie [121]	88
Rys. 5.1. Diagnostyka zużycia narzędzia realizowana według parametru diagnostycznego P , opracowano na podstawie [121]	92
Rys. 5.2. Krzywa zmian parametru diagnostycznego: 0-1 – zakres dojścia narzędzia do przedmiotu, 1-2 – zakres zagłębiania narzędzia w materiał obrabiany, 2-3 – zakres obróbki, 3-4 – wyjście narzędzia z materiału obrabianego, opracowano na podstawie [121]	93
Rys. 5.3. Zmiana wartości oczekiwanej kontrolowanej siły skrawania w czasie obróbki wałka stopniowanego, opracowano na podstawie [121]	94
Rys. 5.4. Algorytm diagnozowania zużycia podczas realizacji technologicznego zabiegu dla jednego ustawienia, opracowano na podstawie [121]	94
Rys. 5.5. Algorytm diagnozowania zużycia podczas realizacji operacji według metody granic, opracowano na podstawie [121]	95
Rys. 5.6. Wzrost wartości siły składowej P_z w czasie przy zniszczeniu dla kryterium jednostronnego P_{zmax} (a) i dwustronnego $F_{zmax} - F_{zmin}$ (b), opracowano na podstawie [121]	97
Rys. 5.7. Algorytm diagnostyki stanu wiertła na podstawie wartości F_{zmax} , opracowano na podstawie [121]	98
Rys. 5.8. Zmiana siły F_z spowodowana zniszczeniem wiertła, opracowano na podstawie [121]	98
Rys. 5.9. Algorytm zniszczenia wiertła na podstawie wartości siły F_z , opracowano na podstawie [121]	98

Rys. 5.10. Zmiana wartości siły elektrodynamicznej skrawania podczas toczenia wzdłużnego: 1 – bez naruszenia, 2 – z naruszeniem kontaktu z materiałem obrabianym, opracowano na podstawie [121]	99
Rys. 6.1. Algorytm diagnozowania stanu wiertel podczas obróbki stali, opracowano na podstawie [121]	105
Rys. 6.2. Zmiana wartości momentu skrawania M_S i siły osiowej P_O w zależności od zużycia VB podczas wiercenia wiertłem o średnicy 10 mm podczas obróbki żeliwa EN-GJS-400-15 o twardości HB 160 (linie 1 i 2) i HB 200 (linie 3 i 4) przy $v_c = 25$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr (linie 1 i 3) oraz $f = 0,2$ mm/obr (linie 2 i 4), opracowano na podstawie [121]	106
Rys. 6.3. Algorytm diagnozowania zużycia wiertel podczas obróbki żeliwa, opracowano na podstawie [121]	107
Rys. 6.4. Technologiczny algorytm diagnozowania wiertel podczas wiercenia stali, opracowano na podstawie [121]	109
Tabela 1.1. Możliwe diagnostyczne cechy stanu narzędzia, wióra i obrabianej części	16
Tabela 3.1. Siłowe diagnostyczne cechy parametrów stanu	51

Wykaz norm

PN-EN 10020:2003. Definicja i klasyfikacja gatunków stali.

PN-EN 10025-2:2007. Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych.

PN-EN 10027-1:2007. Systemy oznaczania stali. Część 1: Znaki stali.

PN-EN 10027-2:1994. Systemy oznaczania stali. System cyfrowy.

PN-EN 10083-1:2008. Stale do ulepszania cieplnego. Część 1: Ogólne warunki techniczne dostawy.

PN-EN 10083-2:2008. Stale do ulepszania cieplnego. Część 2: Warunki techniczne dostawy stali niestopowych.

PN-EN ISO 4957:2004. Stale narzędziowe.

PN-ISO 3002-1:1996. Podstawowe pojęcia w obróbce wiórowej i ściernej. Geometria części roboczej narzędzi skrawających. Terminologia ogólna, układy odniesienia, kąty narzędzia i kąty robocze oraz łamacze wióra.

PN-ISO 3685:1996. Badanie trwałości noży tokarskich punktowych.

PN-ISO 8688-1:1996. Badanie trwałości frezów. Frezowanie czołowe.

PN-ISO 8688-2:1996. Badanie trwałości frezów. Frezowanie obwodowo-czołowe.

PN-M-59100:1984. Materiały i narzędzia ścierne. Terminologia.

Nadzorowanie procesu skrawania i stanu narzędzi z oszczędnościowej stali szybko tnącej

Streszczenie

Specyfika procesów obróbki skrawaniem sprawia, że podczas eksploatacji narzędzia bardzo trudno jest określić optymalny z ekonomicznego punktu widzenia moment wymiany narzędzia. Dla zapewnienia niezawodności diagnozowania konieczne jest przede wszystkim zbadanie stanu narzędzia w konkretnych warunkach jego eksploatacji i określenie zmieniającego się wskaźnika, który może służyć za kryterium oceny narzędzia. Wiedza z zakresu prowadzenia badań niezbędnych do zaprojektowania systemów diagnostycznych jest potrzebna do prawidłowej eksploatacji narzędzi oraz doskonalenia istniejących systemów diagnostyki na obrabiarkach skrawających. Szczególną uwagę poświęcono zadaniom koniecznym do przeprowadzenia prac badawczych, od których powinno się rozpocząć badanie systemów diagnozowania procesu i narzędzia.

Na podstawie badań eksperymentalnych i występującej liczby parametrów skrawania określono pośrednie diagnostyczne cechy możliwych zmian w stanie narzędzia i ich kryterium stanu. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych zmian w stanie wiertła z niskostopowej stali szybko tnącej przy obróbce żeliwa i stali konstrukcyjnej oraz rozkłady temperatury na powierzchni przyłożenia i natarcia ostrza oraz na powierzchni łysinek. Na podstawie badań stwierdzono, że zużycie powierzchni przyłożenia określa cieplny i deformacyjny stan obrabianej części i prowadzący wskutek tego do nieoczekiwane katastroficznego zużycia łysinek. Podczas obróbki żeliwa dominującym miejscem zużycia jest obszar na zewnętrznej powierzchni wiertła. Wiertła ze stali szybko tnącej podczas wiercenia otworów w stali konstrukcyjnej zużywają się przede wszystkim na głównych powierzchniach przelożenia. Porównanie specyfiki zużycia wiertła ze stali szybko tnącej przy obróbce żeliwa i stali powoduje, że podejście do diagnozowania stanu narzędzia w każdym przypadku powinno być różne.

W monografii scharakteryzowano automatyczne stanowiska do diagnozowania stanu narzędzia i procesu skrawania, uwzględniając jednoparametryczne i wieloparametryczne kryteria diagnostyczne. Przedstawiono charakterystykę oraz wyszczególniono wady i zalety czujników parametrów siłowych i akustyczno-emisyjnych czujników drgań stosowanych w procesach obróbki skrawaniem. Dużo uwagi poświęcono także opisowi stanowisk w automatycznym diagnozowaniu stanu narzędzia oraz procesu skrawania. Szczegółowo opisano dostępne czujniki pomiaru parametrów procesu odzwierciedlających stan narzędzia.

Supervision of cutting process and the tool state made of economic high-speed steel

Abstract

Specificity of the machining process causes that in the tool operation it is very difficult to determine the optimal moment of replacement of a tool from the economic point of view. To ensure the reliability of diagnostics, first of all it is necessary to examine the state of the tool in specific conditions of operation and to determine which changing ratio may be used as a criterion of tool evaluation. Knowledge of conducting the research necessary to design diagnostic systems is needed for correct use of tools and the improvement of existing diagnostic systems on the cutting machines. Particular attention was paid to the tasks necessary to carry out the investigations from which an examination of the diagnosis systems of the process and the tool should begin.

On the basis of experimental investigations, indirect diagnostic features of possible changes in the tool state and their state criterion have been specified from the amount of cutting parameters. The results of experimental investigations in the state of drills made of low-alloy high-speed steel during drilling cast iron and constructional steel, and temperature distributions on the tool flank, and blade face and drill margin are presented. Based on the results it was found that the wear of the tool flank describes thermal and deformational state of the workpiece and consequently leading to an unexpected catastrophic wear of drill margins. When machining cast iron the dominant place of the wear is an area on the outer surface of the drill. The wear of high-speed drills when drilling in constructional steel appears primarily on the main tool flank. Comparison of the wear specific of drills made of high-speed steel when machining cast iron and steel causes that the approach to diagnostics of the tool state in each case should be different.

In the study the automatic stands for diagnostics the state of the tool and the cutting process considering one-parameter and multiparameter diagnostic criteria are presented. The characteristics as well as advantages and disadvantages of sensors of force parameters and acoustic-emissive vibration sensors used in the machining processes are described. Much attention was also paid to the description of stands in automatic diagnostics of the state of the tool and the cutting process. The available sensors for the measurement of process parameters that reflect the state of the tool are described in detail.