

Na prawach rękopisu
Do użytku służbowego

INSTYTUT KONSTRUKCJI I EKSPLOATACJI MASZYN
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Raport seria PRE nr P010/93

METODA OPTIMALIZACJI MIKROGEOMETRII
WARSTWY WIERZCHNIEJ
CHROMOWANYCH TULEI CYLINDROWYCH

Andrzej Kaźmierczak

Rozprawa doktorska

Promotor: doc. dr hab. inż. Lech Sitnik

Słowa kluczowe:

silnik spalinowy
węzeł TPC
tuleja cylindrowa
warstwa wierzchnia
zużycie

Wrocław 1993

Pamięci mojej Matki poświęcam

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	5
1. WPROWADZENIE.....	10
2. KINETYKA ZUŻYCIA ELEMENTÓW ORAZ WĘZŁA TPC	11
2.1. Współpraca elementów węzła TPC	12
2.2. Mechanizm zużycia węzła TPC	13
2.3. Stan graniczny węzła TPC	15
2.4. Opis matematyczny kinetyki zużycia węzła TPC	17
2.5. Interpretacja wyników pomiarów wartości zużycia	35
3. IDENTYFIKACJA MIKROGEOMETRII WARSTWY WIERZCHNIEJ TULEI CYLINDROWYCH	38
3.1. Szczegółowy opis mikrogeometrii warstwy wierzchniej tulei cylindrowej	38
3.1.1. Metody opisu struktury geometrycznej warstwy wierzchniej	41
3.1.1.1. Metody analizy profilów zdeterminowanych	42
3.1.1.2. Metody analizy profilów stochastycznych	47
3.2. Wybór parametrów chropowatości mających decydujący wpływ na proces zużycia	54
3.3. Szczegółowy sposób oceny wartości zużycia tulei cylindrowych	55
4. SFORMUŁOWANIE CELU I TEZY PRACY	59
4.1. Cel pracy	59
4.2. Teza pracy	59
5. BADANIA PROCESU ZUŻYCIA WW TULEI CYLINDROWYCH	60
5.1. Opis części skierowanych do badań eksploatacyjnych współpracujących z tulejami cylindrowymi	61
5.1.1. Pierścienie tłokowe	61
5.1.1.1. Pomiary geometrii kształtu i masy	62
5.1.1.2. Pomiary sił sprężystości	63
5.1.2. Pomiary tłoków i sworzni tłokowych	63
5.2. Opis partii chromowanych tulei cylindrowych skierowanych do badań eksploatacyjnych	63
5.2.1. Badania profilometryczne tulei cylindrowych	65
5.2.2. Montaż i pomiary tulei cylindrowych w silnikach typu 6CT 107	65
6. WYNIKI BADAŃ PROCESU ZUŻYCIA WW TULEI CYLINDROWYCH W EKSPLOATACJI NATURALNEJ	66
6.1. Wartości zużycia tulei cylindrowych w badaniach	

eksploatacyjnych	66
6.1.1. Wartości zużycia tulei cylindrowych w gniazdach	67
6.1.2. Wartości zużycia tulei cylindrowych w kierunkach pomiarowych	70
6.2. Wyniki badań eksploatacyjnych tulei chromowanych	72
6.2.1. Badanie istotności różnic średnich wartości zużycia chromowanych tulei cylindrowych w poszczególnych kierunkach pomiarowych	73
6.2.2. Analiza statystyczna wartości zużycia tulei chromowanych	75
6.2.1.1. Uwagi na temat dopasowania rozkładów statystycznych do wartości zużycia tulei cylindrowych	86
6.2.3. Analiza regresji wartości zużycia w trzecim kierunku pomiarowym	92
7. METODA PROWADZENIA BADAŃ TRWAŁOŚCIOWYCH WĘZŁA TPC	97
7.1. Schemat procesu zużycia	97
7.2. Rodzaje badań procesu zużycia	102
7.3. Propozycja metody prowadzenia badań procesu zużycia	105
7.3.1. Czynniki wymuszające	106
7.3.2. Obiekt badań	107
7.3.3. Odpowiedzi obiektu	109
7.4. Przykład zastosowania metody prowadzenia badań procesu zużycia węzła TPC - badania symulacyjne	111
8. BADANIA PROCESU ZUŻYCIA WW CHROMOWANYCH TULEI CYLINDROWYCH PROWADZONE WG PLANOWANEGO EKSPERYMENTU	120
8.1. Wybór planu eksperymentu	120
8.2. Normowanie czynników wymuszających planu eksperymentu	121
8.3. Postać wielomianu aproksymującego wartość zużycia	123
8.4. Macierz informacyjna planu eksperymentu	124
8.5. Opracowanie wyników badań przeprowadzonych w ramach planowanego eksperymentu	124
8.6. Zastosowanie wielomianów aproksymujących wartości zużycia tulei cylindrowych otrzymanych na podstawie eksperymentu planowanego do badań procesu zużycia tulei cylindrowych prowadzonych w ramach kontrolowanego eksperymentu biernego	129
9. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE	132
10. LITERATURA	137

Wykaz ważniejszych oznaczeń.

A_1	powierzchnia,
A_2	powierzchnia,
b	wektor parametrów,
b_s	współczynniki ($s = 1, \dots, s$),
C	wektor cech obiektu,
c_k	charakterystyki obiektu rzeczywistego,
c_{kmin}	minimalna wartość cechy obiektu,
c_{kmax}	maksymalna wartość cechy obiektu,
C_{Kp}	cechy konstrukcyjne pierścienia,
C_{Kt}	cechy konstrukcyjne tulei,
C_{Ktl}	cechy konstrukcyjne tłoka,
C_{Mp}	cechy materiałowe pierścienia tłokowego,
C_{Mt}	cechy materiałowe tulei cylindrowej,
C_{Mtl}	cechy materiałowe tłoka,
C_{Tp}	cechy technologiczne pierścienia,
C_{Tt}	cechy technologiczne tulei,
C_{Ttl}	cechy technologiczne tłoka,
DMP	dolne martwe położenie tłoka; zwrot zewnętrzny,
E	wektor wymuszeń eksploatacyjnych,
E_M	model matematyczny procesu,
E_0	model matematyczny procesu zużycia,
$E(m, t)$	wartość oczekiwana,
F	wektor sił,
$F(z)$	dystrybuanta (krzywa nośności),
$f(z)$	gęstość profilu powierzchni (rozkład rzędnych),
$F_p(t)$	dystrybuanta zmiennej czasowej T_p ,
$f_p(t)$	gęstość zmiennej czasowej T_p ,
$f(E, C_{Tt})$	funkcja aproksymująca,
FAK	funkcja autokorelacji,
G_t	proces stochastyczny,
$G(\omega)$	gęstość widmowa mocy,
GMP	górne martwe położenie tłoka; zwrot wewnętrzny,
H	twardość materiału,
$\bar{h}(l)$	wartość średnia profilu chropowatości,
$h_j(l)$	proces stochastyczny będący zbiorem realizacji profilogramów,
K	wektor cech konstrukcyjnych obiektu,
K	macierz kowariancji,
M	wektor cech technologiczno - materiałowych obiektu,

M	metoda próby ciąglej,
m	jednostkowa liczba wierzchołków profilu chropowatości,
$M(t)$	masa zużytego materiału w czasie t ,
$\bar{m}(t)$	średnia masa cząstki materiału,
m_a	masa,
m_i	masa cząstki materiału,
M_n	moment spektralny,
$M_p(t)$	kinetyka zużycia materiałowego pierścienia tłokowego,
M_{r1}	udział materiałowy,
M_{r2}	udział materiałowy,
$M_t(t)$	kinetyka zużycia materiałowego tulei cylindrowej,
$M_{t1}(t)$	kinetyka zużycia materiałowego tłoka,
$m_z(t)$	wartość oczekiwana stochastycznego procesu zużycia,
$\max Z_t(t)$	ekstremum predkości przyrostu zużycia liniowego tulei cylindr.
n	liczność próby,
$n(0)$	jednostkowa liczba przecięć profilu z linią średnią,
$n(t)$	liczba oderwanych cząstek materiału,
n_{ij}	elementy macierzy kowariancji K ,
p_l	wielkość charakteryzująca proces technologiczny,
p_{max}	maksymalne ciśnienie spalania,
P_o	wektor ciśnień w filmie olejowym,
P_r	wektor strat ładunku,
$p(\varepsilon)$	gęstość prawdopodobieństwa,
p_{ol}	ciśnienie oleju,
p_{pc}	parametry próby ciąglej,
PS	metoda punktów szczególnych,
Q	obciążenia wymuszające,
Q_p	prawdopodobieństwo,
R	wektor relacji,
R^2	współczynnik korelacji wielowymiarowej,
$R(\tau)$	funkcja autokorelacji,
$\hat{R}(\tau)$	aproksymacja funkcji autokorelacji,
R_a	średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości,
R_k	zredukowana wysokość chropowatości,
R_j	ciąg relacji,
R_m	maksymalna wysokość nierówności,
R_p	maksymalna wysokość wzniesienia profilu chropowatości,
R_q	średnie kwadratowe odchylenie profilu chropowatości,
R_v	maksymalna głębokość wgłębienia profilu chropowatości,
R_z	wysokość chropowatości wg 10 punktów,

$R_p(t)$	prawdopodobieństwo,
R_{ku}	kurtoza profilu chropowatości,
R_{pk}	zredukowana wysokość wzniesienia profilu chropowatości,
R_{sk}	współczynnik skośności profilu chropowatości,
R_{vk}	zredukowana wysokość wgłębienia profilu chropowatości,
S	wektor parametrów silnika,
S	średni odstęp miejscowych wzniesień profilu,
S_m	średni odstęp chropowatości,
S_p	wektor stanu parametrów chropowatości,
S_{sp}	wektor stanu parametrów stref podpowierzchniowych,
S_{ww}	wektor stanu warstwy wierzchniej,
T	wektor temperatur,
t	czas,
t_{kr}	wartość krytyczna statystyki t - Studenta,
T_B	całkowity czas badań,
T_p	stochastyczna zmienna czasowa,
t_s	statystyka t - Studenta,
t_{ij}	statystyka t - Studenta dla porównania dwóch średnich "i", "j"
TPC	węzeł tarcia: Tłok - Pierścien tłokowy - tuleja Cylindrowa,
V	wektor wejść obiektu,
V	zmienna losowa,
$\hat{v}_i$	odzworowanie realizacji rzeczywistych wejść obiektu ($i=\overline{1, I}$),
v_s	wartość modelowa wartości rzeczywistej v_s ,
V_{ob}	wektor czynników obiektywnych,
V_{sub}	wektor czynników subiektywnych,
v_{tl}	prędkość tłoka,
v_{smin}	minimalna wartość wielkości wejściowej,
v_{smax}	maksymalna wartość wielkości wejściowej,
$V_p(t)$	kinetyka zużycia objętościowego pierścienia,
$V_t(t)$	kinetyka zużycia objętościowego tulei cylindrowej,
$V_{tl}(t)$	kinetyka zużycia objętościowego tłoka,
W	wektor wejść obiektu,
w_l	odzworowanie realizacji rzeczywistych wyjść obiektu ($l=\overline{1, L}$)
W_p	prawdopodobieństwo,
W_t	odpowiedzi obiektu, których wartość zależy od czasu,
W_w	wielkość charakteryzująca warstwę wierzchnią,
W_{nt}	odpowiedzi obiektu, których wartość nie zależy od czasu,
WW	warstwa wierzchnia,
X	macierz wejść analizy regresji,
x_s	standaryzowane wartości wielkości wejściowych ($s = 1, \dots, s$),

y	wektor wartości wyjść obiektu,
$\hat{y}$	wektor wartości wyjść modelu,
$\hat{z}$	model matematyczny procesu zużycia; funkcja aproksymująca,
Z_o	zmienna losowa,
Z_t	stochastyczny proces zużycia,
$Z_p(t)$	kinetyka zużycia liniowego pierścienia tłokowego,
$Z_t(t)$	kinetyka zużycia liniowego tulei cylindrowej,
$\hat{Z}_t(t)$	estymator kinetyki zużycia liniowego tulei cylindrowej,
$\dot{Z}_t(t)$	prędkość przyrostu zużycia liniowego tulei cylindrowej,
$Z_{t1}(t)$	kinetyka zużycia liniowego tłoka,
$\{v_s\}$	czynniki wymuszające kontrolowalne i sterowalne,
$\{v_u\}$	czynniki wymuszające tylko kontrolowalne,
$\{v_z\}$	wielkości zakłócające,
α	poziom istotności,
α_g	długość ramienia gwiazdowego planu eksperymentu kompozycyjnego,
α_k	parametr rozkładu Weibulla kształtu krzywej,
α_m	szerokość widma mocy,
α_o	skala,
α_s	skala,
α_{ww}	kąt wyprzedzenia wtrysku,
β	parametr rozkładu Weibulla określający skalę,
Δ	wyznacznik macierzy kowariancji K,
Δt	przedział czasu,
Δz	błąd bezwzględny,
$\Delta \Psi_r(t_1)$	jednowymiarowy, normalny proces stacjonarny,
ε_1	zmienna losowa,
ε_2	zmienna losowa,
ε_3	zmienna losowa,
Φ	zbiór pusty,
Φ_1	funkcja aproksymująca,
$\Psi_{\omega t}$	proces stochastyczny,
Ψ_{rt}	proces stochastyczny,
χ^2	statystyka χ^2 ,
γ_{LH}	wskaźnik anizotropii Longuet - Higgins'a,
γ_P	współczynnik anizotropii powierzchni,
γ_R	wskaźnik anizotropii Rudzita,
λ	współczynnik,
$\lambda_p(t)$	intensywność odrywania cząstek materiału,
λ_u	intensywność użytkowania,
μ_2	moment centralny profilu chropowatości rzędu drugiego,

μ_3	moment centralny profilu chropowatości rzędu trzeciego,
μ_4	moment centralny profilu chropowatości rzędu czwartego,
π_1	aproksymacja parametru R_a ,
π_2	aproksymacja parametru $n(0)$,
π_3	aproksymacja parametru m ,
$\rho(\tau)$	unormowana postać funkcji autokorelacji,
$\hat{\rho}(\tau)$	aproksymacja unormowanej postaci funkcji autokorelacji,
σ	średnie kwadratowe odchylenie profilu chropowatości,
$\sigma_2^2(t)$	wariancja stochastycznego procesu zużycia,

1. WROWADZENIE.

Silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym stanowią obecnie główne źródło napędu stosowane w ciężkich pojazdach samochodowych, żegludze śródlądowej, maszynach budowlanych, górniczych itp. Użytkowanie ich jest związane z kosztami, na które składają się koszty wytwarzania i eksploatacji. Istnieje stała tendencja poszukiwania możliwości obniżenia tych kosztów. Możliwości są tu wciąż niewyczerpane [5].

Przykładem może tu być zmniejszanie oporów ruchu silników i optymalizacja ich trwałości. Wiąże się to z dążeniem do minimalizacji krotności napraw głównych silników. Minimalizację tą można osiągnąć przez uzyskiwanie jednakowego potencjału eksploatacyjnego elementów silnika i podnoszenie jego resursu. Jest to jednocześnie kryterium optymalizacji trwałości silnika.

Silnik spalinowy jest strukturą eksploatacyjną szeregowo - równoległą [26], przy czym o resursie silnika decyduje trwałość elementów i węzłów włączonych w strukturę szeregowo.

Jednym z głównych węzłów, włączonych w strukturę eksploatacyjną silnika szeregowo, decydującym o jego trwałości, jest węzeł TPC (tłok, pierścienie tłokowe, tuleja cylindrowa).

Optymalizacja trwałości węzła silnika (np. węzła TPC) wymaga dogłębnej identyfikacji procesów w nim zachodzących. Identyfikację tą przeprowadzić można, między innymi, stosując metody systemowe. Pozwolić to powinno, w dalszej kolejności, na sterowanie trwałością. Wymaga to jednak opracowania i wdrożenia do praktyki badawczej nowych metod.

Jedną z możliwych metod przedstawiono w niniejszej pracy.

Brak takich metod - czego przykładem jest stosowana do tej pory praktyka, zwłaszcza w odniesieniu do badań eksploatacyjnych, aposteriorycznego opracowywania, dla optymalizacji trwałości silników, wyników pomiarów, uzyskiwanych po określonych ich przebiegach - prowadzi, aż nazbyt często, do niezadowalających efektów.

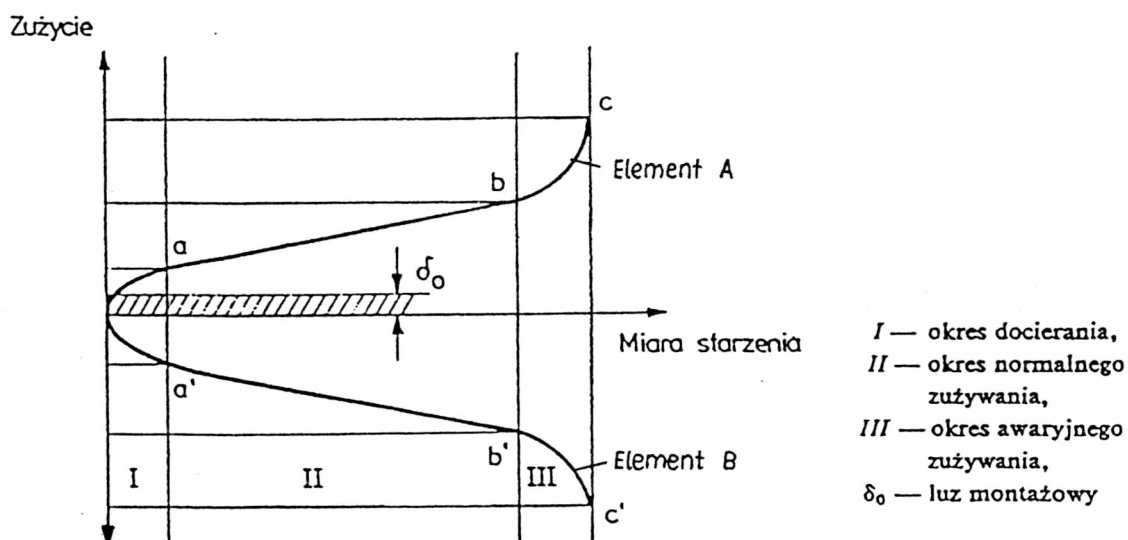
Zamierzeniem autora było opracowanie metody badań eksploatacyjnych umożliwiającej sterowanie trwałością silnika. Metoda ta, w założeniach, powinna umożliwić uzyskiwanie jednakowego potencjału eksploatacyjnego elementów silnika i podnoszenie jego resursu.

Zastosowano ją w zdekomponowanym problemie trwałości silnika do trwałości węzła TPC, a w szczególności do trwałości tulei cylindrowej tj. w optymalizacji mikrogeometrii jej warstwy wierzchniej.

Wyda się, że wykazano przydatność opracowanej metody.

2. KINETYKA ZUŻYCIA ELEMENTÓW ORAZ WĘZŁA TPC.

Kinetyka zużycia elementów węzła TPC oraz węzła jako całości zależy od doskonałości jego konstrukcji, jakości wykonania, stosowanych materiałów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych oraz warunków eksploatacji. Kinetykę procesu zużycia dwóch współpracujących elementów A i B (mogą to być elementy węzła TPC tuleja cylindrowa i pierścień tłokowy), przedstawiono na rys. 1 [26]. Zużycie jest przedstawione w funkcji miary starzenia (czasu, przebiegu).



Rys. 1. Kinetyka procesu zużycia elementów skojarzenia [26].

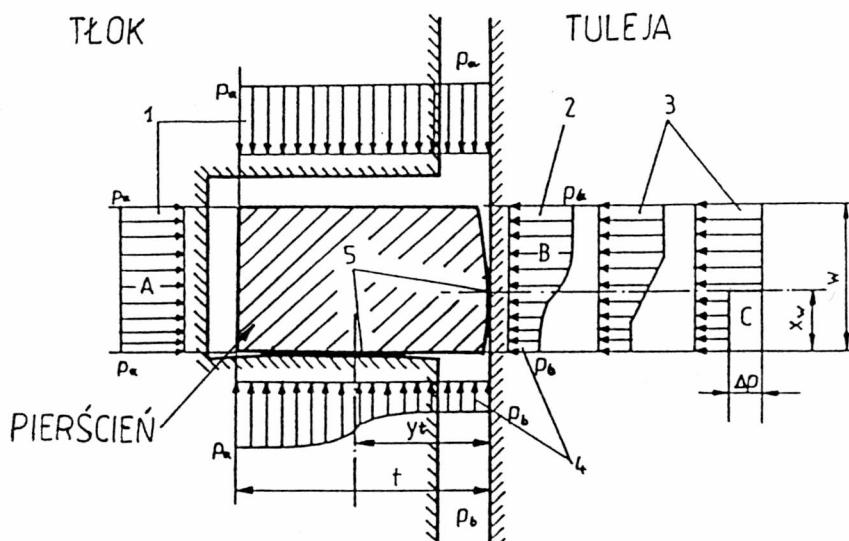
W przebiegu zużycia (rys. 1) wyróżnić można trzy okresy. Pierwszy (I) jest okresem docierania skojarzenia. Charakteryzuje się on szybkim przyrostem zużycia w funkcji miary starzenia aż do osiągnięcia wartości "a" zwanej nominalną. Po jej osiągnięciu rozpoczyna się drugi okres, zwany okresem zużycia ustabilizowanego (II). Charakteryzuje się on małym przyrostem wartości zużycia w stosunkowo długim przedziale miary starzenia. Okres ten może ulegać skróceniu lub wydłużeniu w zależności od warunków eksploatacji. Zużycie rośnie, aż do osiągnięcia wartości "b" zwanej dopuszczalną.

Dalsza praca skojarzenia przebiega w warunkach nadmiernego luzu i zwiększonych obciążeń dynamicznych, rozpoczyna się trzeci okres eksploatacji (III) zwany okresem awaryjnego zużywania. W tym okresie przyrost wartości zużycia w stosunku do miary zużywania elementu jest dość znaczny, może nastąpić uszkodzenie elementu przed lub po osiągnięciu wartości zużycia oznaczonej jako "c", a noszącej nazwę zużycia granicznego. Osiągnięcie takiej wartości zużycia jest stanem granicznym dla tego skojarzenia.

2.1. Współpraca elementów węzła TPC.

Współpraca elementów węzła TPC ma na celu zapewnienie szczelności połączenia. Decydującą rolę odgrywa tu pierścień tłokowy, który uszczelnia przestrzeń ponad sobą dzięki stykowi zewnętrznej powierzchni czołowej z powierzchnią otworu tulei cylindrowej oraz dzięki stykom z dolną powierzchnią boczną rowka tłoka [59], [38], [7], [31], [50], [9].

Styk z powierzchnią otworu tulei cylindrowej uzyskuje się początkowo dzięki sprężystemu oddziaływaniu pierścienia, następnie spadek ciśnienia za pierścieniem pozwala go docisnąć do dolnego boku rowka. Gdy uszczelnienie zostanie uzyskane na dolnej powierzchni bocznej, ciśnienie z przestrzeni powyżej pierścienia jest przekazywane za pierścień poprzez przestrzeń nad pierścieniem, a następnie ciśnienie powyżej i za pierścieniem stanowi główną siłę uszczelniającą (rys. 2).



- 1 - rozkład ciśnienia za pierścieniem (A),
- 2 - rozkład ciśnienia na powierzchni czołowej pierścienia (B),
- 3 - przybliżone rozkłady równoważne z 2,
- 4 - rozkłady ciśnienia hydrostatycznego na powierzchniach uszczelniających pierścień,
- 5 - punkty minimalnego odstępu,
- $C \cong x_w \Delta p$ - promieniowe obciążenie ciśnieniem gazów,
- $x_w \Delta p$ - ciśnienie efektywne wywołane przez C,
- $y_t \Delta p$ - ciśnienie efektywne wywołane osiowym obciążeniem ciśnieniem gazów.

Rys. 2. Efektywne obciążenie pierścienia wywołane ciśnieniem gazów [59].

W czasie trwania suwu tłoka pierścienie są oddzielone od tulei filmem olejowym, a mają tendencję do uzyskania styku z tuleją i przerwania filmu olejowego tylko w okolicy położen zwrotnych. Wpływ na grubość filmu olejowego oraz występowanie zjawiska jego przerwania mają takie czynniki jak:

- ciśnienie w cylindrze,
- prędkość robocza,
- stosowanie olejów o małej lepkości w wysokiej temperaturze pracy,
- wyprzedzenie kąta wtrysku powyżej punktu optymalnego,
- zmniejszone zasilanie olejem.

Pierwotnym mechanizmem tworzenia się filmu olejowego na powierzchni tulei cylindrowej jest hydrodynamiczny efekt klina smarnego [59]. Klin smarny jest tworzony przez olej na gładzi tulei cylindrowej przed pierścieniem, a zależy od:

- względnej prędkości poślizgu pierścienia po tulei cylindrowej,
- profilu roboczej powierzchni pierścienia,
- struktury geometrycznej powierzchni i struktury fizyczno - chemicznej stref warstwy wierzchniej.

Utworzony film olejowy wystarcza zwykle do oddzielenia powierzchni pierścienia i tulei w środkowej części suwu, gdy pierścień posiada znaczną prędkość poślizgu. Przy braku jakiegokolwiek innego oddziaływania hydrodynamicznego pierścień opadłby na powierzchnię tulei na końcach suwów; w pobliżu GMP i DMP. Takiemu zjawisku zapobiega, w pewnym stopniu, usuwanie oleju z przestrzeni pomiędzy pierścieniem tłokowym a tuleją cylindrową powstające wskutek sprężystego oddziaływania pierścienia. Zjawisku temu towarzyszy wzrost ciśnienia hydrodynamicznego. Jest ono znane jako efekt ściskania.

2.2. Mechanizm zużycia węzła TPC.

Węzeł TPC pracuje w warunkach obciążeń mechanicznych, chemicznych, zmęczeniowych i korozyjnych [69], [73]. W związku z tym występują tutaj niemalże wszystkie spotykane postacie zużycia [61], [59]. Można je podzielić na trzy rodzaje :

- zużycie adhezyjne, skrawanie i odkształcenia,
- zużycie ściernie,
- zużycie korozyjne.

Zużycie adhezyjne, skrawanie i odkształcenia. Skrawanie i odkształcenia są spowodowane przerwaniem filmu olejowego przez szczyty nierówności powierzchni jednego z elementów węzła oraz ich przemieszczaniem. Procesy te powodują usuwanie szczytów nierówności w strefie wierzchołków powierzchniowych, co może prowadzić do całkowitego ich zaniku. Zjawiska te występują szczególnie silnie w początkowej fazie ruchu; procesie docierania. Zużycie adhezyjne występuje wtedy, gdy po deformacji występow powierzchnia jednego z elementów węzła TPC oczyszczona wcześniej z tlenków i substancji smarnych tak zbliży się do współpartnera, że dochodzi do molekularnego oddziaływania dwóch materiałów. Następuje wtedy, przy ruchu elementów względem siebie wyrywanie części warstwy partnera, którego wytrzymałość jest mniejsza. Jeżeli w wyniku zużycia adhezyjnego dochodzi do nalepiania się wyrwanego materiału na powierzchni drugiego elementu, to następuje zmiana chropowatości powierzchni i narastanie zużycia partnera przez skrawanie i odkształcenia. Wzrost temperatury, a tym samym intensyfikacji procesu zużycia doprowadza do zatarcia [61].

Zużycie ściernie jest wywołane przez czastki stałe, które dostały się pomiędzy elementy węzła TPC. Wśród nich można wyróżnić:

1. Materiał ścierny z recyrkulacji do miski olejowej. Jego ilość zależy od skuteczności filtracji oleju smarującego, a głównym skutkiem jest wzrost zużycia pary trącej pierścienie tłokowe - tuleja cylindrowa,
2. Pył w powietrzu zasysanym do cylindra. Jego ilość, typ i wymiary są uzależnione od środowiska w jakim jest eksploatowany silnik oraz sprawności układu filtracji powietrza. Wielkość cząstek zawartych w powietrzu waha się od 1 do 200 μm ,
3. Produkty spalania powstałe w komorze spalania silnika. Są to głównie twardy popiół oraz oderwane osady utworzone ze spalonego paliwa oraz oleju smarującego,
4. Produkty powstałe w wyniku zużycia elementów składowych. Wymiary tych cząstek wahają się od 0,5 do 6 μm ,
5. Zanieczyszczenia znajdujące się w paliwie.

Zależność zużycia pary trącej tuleja cylindrowa - pierścienie

tłokowe od koncentracji cząstek ściernych jest w przybliżeniu liniowa, co wykazały różne badania, między innymi przyspieszonego zużycia [29]. Decydujący wpływ na wartość zużycia wężła TPC mają:

- wielkość cząstek,
- kształt cząstek,
- twardość cząstek.

Zużycie korozyjne stanowi mechanizm w wyniku którego na powierzchni elementów wężła TPC powstają związki chemiczne, niemetaliczne, które zostają usunięte w wyniku współpracy elementów. Korozja w silnikach spalinowych może być wywoływana przez różne czynniki, między innymi kondensację wody oraz różnych kwasów powstałych podczas spalania [42]. Jednakże istnieją dwa przypadki w których zużycie korozyjne jest bardzo znaczne.

Pierwszy przypadek ma miejsce gdy temperatura tulei cylindrowej jest wystarczająco niska, by wystąpiła kondensacja par kwasu siarkowego na tulei cylindrowej. Temperatura tulei musi w tym wypadku spaść do punktu rosy odpowiadającego parze aktualnie znajdującej się w komorze spalania, dopiero wtedy nastąpi jej kondensacja [38]. Obecność w produktach spalania związków siarki SO_2 oraz SO_3 podwyższa punkt rosy o 80 do 115 °C powyżej punktu rosy czystej pary wodnej. W związku z tym, wskutek rozpuszczenia SO_2 oraz SO_3 w kondensacie, powstają kwasy; siarkawy oraz siarkowy. Aktywność korozyjna kwasu siarkowego jest stosunkowo mała, w przeciwieństwie do kwasu siarkowego. Działanie korodujące kwasu siarkowego zależne jest od jego koncentracji. Najbardziej niebezpieczna jest koncentracja w granicach od 20 do 60 %. Badania opisane w pracy [19] wykazują, że przy zawartości w paliwie 0.8% siarki następuje intensywny wzrost zużycia pierścieni tłokowych i gładzi tulei cylindrowej, gdy temperatura tych detali, przy położeniu tłoka w GMP, jest niższa niż 115 °C.

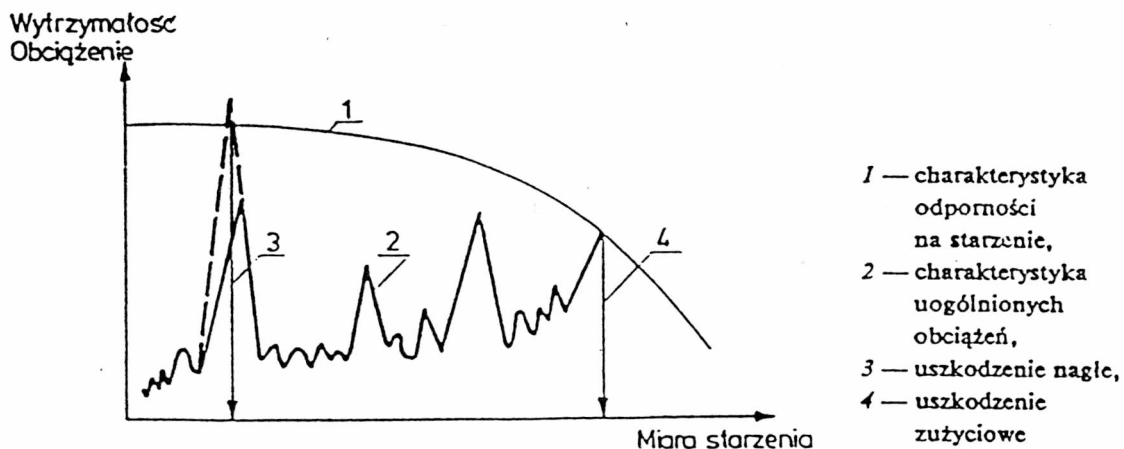
Drugi przypadek ma miejsce, gdy paliwo jest pozbawione siarki, a temperatura tulei jest tak niska, że umożliwia kondensację wody. W takiej sytuacji w wyniku rozpuszczenia CO_2 w wodzie powstaje kwas węglowy.

2.3. Stan graniczny wężła TPC.

Stanem granicznym jest pewna wartość parametru lub grupy parametrów danego elementu struktury eksploatacyjnej, po osiągnięciu której dalsza

jej eksploatacja jest niemożliwa [26].

W węźle TPC stanem granicznym jest osiągnięcie przez którykolwiek z jego elementów granicznej wartości zużycia eliminującej węzeł jako całość. Przykładem może być usunięcie warstwy chromu z tulei chromowanej.



Rys. 3. Fizyczny model powstawania uszkodzeń [26].

Węzeł TPC ma określoną odporność na starzenie, zależną od wytrzymałości oraz odporności na zużycie jego elementów (rys. 3). Jeżeli wartości charakterystyki odporności na starzenie (krzywa 1) przewyższają wartości charakterystyki uogólnionych obciążeń (krzywa 2), to element dany znajduje się w stanie umożliwiającym jego dalszą eksploatację tzn. w stanie zdatności. W przeciwnym wypadku element znajduje się w stanie niezdatności. Uszkodzenie nagłe może być efektem np. urwania się grzybka zaworu i wzrostu uogólnionych obciążeń (rys.3). Stan techniczny całego węzła w danej chwili jest uzależniony od stanu technicznego poszczególnych elementów. W przypadku węzła TPC stan zdatności jest określany jako pewna graniczna wartość zużycia tulei cylindrowej, współpracującego z nią pierścienia tłokowego (zespołu pierścieni tłokowych) oraz tłoka. Przejście ze stanu zdatności w stan niezdatności następuje po osiągnięciu przez element węzła lub węzeł stanu granicznego.

2.4. Opis matematyczny kinetyki zużycia węzła TPC.

Proces zużycia jest skomplikowany i trudno poddaje się opisom matematycznym. Pomimo to podejmowane są próby jego matematycznego opisu. Celem tego opisu jest stworzenie modeli stochastycznych kinetyki zużycia. Modele te umożliwiają przewidywanie uszkodzeń lub stanów granicznych obiektu, mimo niepełnej znajomości mechanizmu zjawisk fizycznych.

Najprostsze ujęcie zużycia zaproponowano np. w pracach [21], [37], [60]. Przedstawiony tam model matematyczny jest funkcją losową postaci:

$$Z_t = Z_0 + Vt \quad (1)$$

gdzie:

Z_t - losowy proces zużycia

Z_0 - zmienna losowa opisująca początkową wartość zużycia (po dotarciu),

V - zmienna losowa niezależna od czasu, opisująca intensywność zużywania się.

Model ten można stosować w przypadku ustalonych warunków pracy obiektu. Pewną modyfikację tego opisu kinetyki zużycia polegającą na założeniu potęgowej zamiast liniowej funkcji przebiegu zużycia przedstawiono w pracy [43].

Innym ujęciem jest uzależnienie intensywności zużywania się obiektu od czynników losowo zmiennych w czasie. W tym celu wykorzystano do opisu kinetyki zużycia proces Poissona [21], [37], [75], [76]. Założono, że w miarę upływu czasu na obiekt oddziałują pojawiające się losowo wymuszenia w postaci jednakowych bodźców. Skutkiem działania pojedynczego bodźca jest przyrost zużycia o pewną stałą wartość w konkretnych chwilach czasu. Opis taki zakłada przebieg zużycia w sposób skokowy. Jeżeli X_t będzie skumulowana liczba bodźców do chwili t opisana jednorodnym procesem Poissona, to wartość zużycia w chwili t wyniesie:

$$Z_t = h X_t \quad (2)$$

gdzie:

Z_t - losowy proces zużycia,

h - wartość stała,

X_t - skumulowana liczba bodźców do chwili t opisana jednorodnym procesem

Poissona, dla którego:

$$P(X_t = k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad k = 0, 1, \dots \quad (3)$$

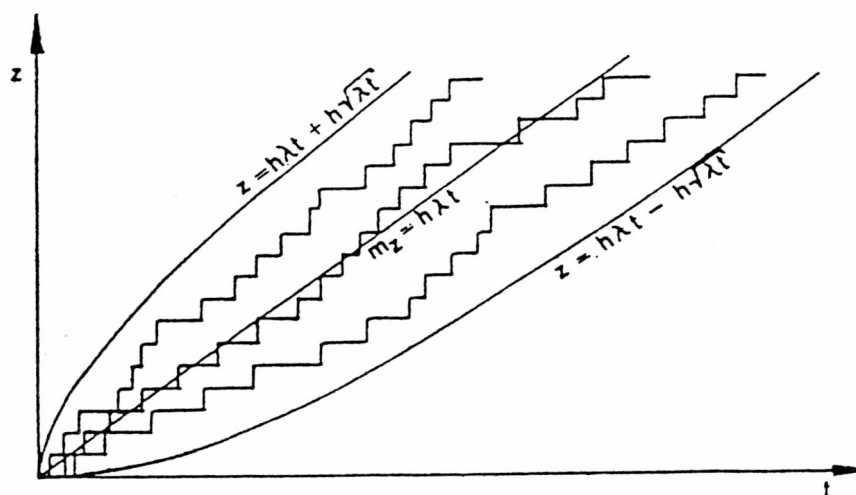
λ - intensywność pojawiania się bodźców wymuszających zużywanie się obiektu.

Wartość oczekiwana i odchylenie standardowe zużycia do chwili t są wtedy równe:

$$m_z(t) = h\lambda t \quad (4)$$

$$\sigma_z(t) = h\sqrt{\lambda t} \quad (5)$$

Na rys. 4 przedstawiono kinetykę zużycia z wykorzystaniem do jej opisu procesu Poissona. Przy czym zaznaczono przebieg wartości oczekiwanej oraz krzywe ograniczające obszar jednakowego prawdopodobieństwa.



Rys. 4. Kinetyka zużycia z wykorzystaniem do jej opisu procesu Poissona.

Przypisując przyrosty zużycia przedziałom czasu, otrzymuje się proces o realizacjach ciągłych. Taką kinetykę zużycia można zamodelować procesem Wienera [54], [55] (rys. 5). Zakłada się tu, że odporność obiektu na zużycie jest stabilna w czasie.

$$Z_t = W_t, \quad t \geq 0 \quad (6)$$

gdzie:

W_t - proces Wienera,
 Z_t - losowy proces zużycia.

Zakładając $W_0 = 0$ z własności procesu Wienera wynika, że:

$$Z_{t-t_s} \sim N [a(t-t_s), b\sqrt{t-t_s}] \quad (7)$$

gdzie:

Z_{t-t_s} - jest zmienną losową opisującą przyrosty zużycia w przedziałach czasu $t-t_s$, przy czym $0 \leq t_s \leq t$,
 a - tzw. parametrem unoszenia,
 b - odchylenie standardowe przyrostów zużycia w jednostkowych przedziałach czasu.

Dla dowolnego, ustalonego przedziału czasu $t-t_s$ można przyjąć, że proces przyrostów zużycia jest gaussowski i stacjonarny. Przyrosty zużycia rozpatrywane w granicy $(t-t_s) \rightarrow 0$ można traktować jako intensywność zużywania. Wtedy wyrażenie (7) przekształca się do postaci:

$$\lim_{(t-t_s) \rightarrow 0} Z_{t-t_s} = V_{1t} \sim N(m_{v1}, \sigma_{v1}) \quad (8)$$

gdzie:

V_{1t} - jest losowo zmienną w czasie intensywnością zużywania,
 m_{v1}, σ_{v1} - są stałe w czasie i oznaczają odpowiednio wartość oczekiwaną i odchylenie standardowe zmiennej V_{1t} .

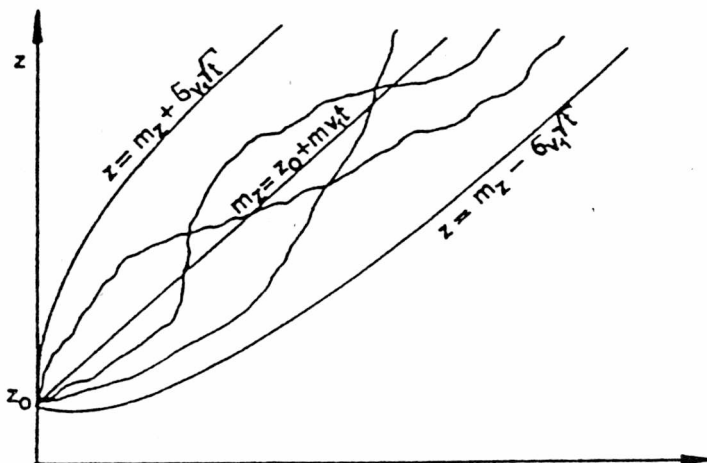
$$m_{v1} = \lim_{t-t_s \rightarrow 0} \frac{E(Z_{t-t_s})}{t-t_s} = a \quad (9)$$

$$\sigma_{v1} = \left[\lim_{t-t_s \rightarrow 0} \frac{\text{Var}(Z_{t-t_s})}{t-t_s} \right]^{1/2} = b \quad (10)$$

Przyjmując $W_0 = z_0$, $E(Z_0) = z_0$ (z_0 - początkowa wartość zużycia) oraz $t_s = 0$, można zapisać zależności wartości oczekiwanej zużycia i odchylenia standardowego względem czasu:

$$m_z(t) = z_0 + m_{v1} t \quad (11)$$

$$\sigma_z(t) = \sigma_{v1} \sqrt{t} \quad (12)$$



Rys. 5. Kinetyka zużycia opisana procesem Wienera [55].

W cytowanych do tej pory pracach przedstawiono proste modele procesu zużycia tzn procesy o realizacjach funkcyjnych oraz procesy o niezależnych przyrostach, które nie odzwierciedlają w sposób pełny przebiegu procesu zużywania się. W pierwszym przypadku model ujmuje tylko wpływ indywidualnych różnic odporności na zużywanie się, w drugim tylko wpływ losowego zróżnicowania obciążeń w czasie.

Uogólnienie opisu może być uzyskane poprzez rozbudowę modeli prostych do modeli stanowiących złożenie dwóch składników, z których pierwszy reprezentuje ustabilizowany przebieg realizacji, drugi chwilowe wahania wartości rzeczywistych względem przebiegu ustabilizowanego [4], [53]. Model przedstawiony w [4] opisuje wyrażenie:

$$Z_t = Z_0 + Vt + \sigma_1 \int_0^t X(t_s) dt_s \quad (13)$$

gdzie:

Z_t - losowy proces zużycia,

$t \geq 0$ - czas,

Z_0 - zużycie początkowe jako zmienna losowa przy czym $Z_0 \sim N(z_0, \sigma_0)$,

V - uśredniona w czasie prędkość realizacji zużycia, przy czym

$$V \sim N(m_v, \sigma_v),$$

σ_1 - odchylenie standardowe zmian prędkości realizacji zużycia w czasie, przy czym $\sigma_1 = \text{const.}$,

$X(t_s)$ - standaryzowany proces Wienera $X(t_s) \sim N(0,1)$.

Składnik Z_0 posiada losowy charakter, co opisuje zróżnicowanie wartości początkowych zużycia po okresie docierania. Drugi składnik reprezentuje uśredniony w czasie przebieg zużycia. Losowa zmienność tego składnika opisuje zróżnicowanie jakości obiektów w populacji. Trzeci składnik reprezentuje przypadkowe fluktuacje wartości zużycia, które interpretowane są jako chwilowe zmiany własności powierzchni trących w czasie pracy [3].

W pracy [53] zużycie zostało opisane jako niestacjonarny proces losowy stanowiący sumę procesu stacjonarnego i funkcji czasu o losowych parametrach:

$$Z_t = X_t + Y_t \quad (14)$$

gdzie:

Z_t - losowy proces zużycia,

X_t - stacjonarny proces reprezentujący chwilowe odchylenia (fluktuacje) zużycia od wartości oczekiwanej; w każdej realizacji taki, że $X_t \sim N(0, \sigma_2)$,

Y_t - zdeterminowana funkcja czasu o losowych parametrach.

W dotychczas przedstawionych modelach opisujących przebieg procesu zużycia zakładano pewną wstępną wartość zużycia wynikającą z okresu docierania. Nie zajmowano się samym okresem docierania, czyli początkiem procesu zużycia. W pracy [66] autor proponuje opis matematyczny kinetyki zużycia kawitacyjnego tulei cylindrowych. Przebieg procesu zużycia ściernego może być hipotetycznie podobny do zużycia kawitacyjnego. Zakłada się, że polega on na odrywaniu cząstek materiału tulei. Masę oderwanych w ten sposób cząstek można zapisać jako:

$$M(t) = m_1 + m_2 + \dots + m_{n(t)} = \sum_{i=1}^{n(t)} m_i = n(t) \bar{m}(t) \quad (15)$$

gdzie:

$M(t)$ - masa materiału odspojona do czasu t ,

m_i - masa pojedynczej cząstki materiału,

$n(t)$ - liczba cząstek materiału odspojonych do czasu t .

$\bar{m}(t)$ - średnia masa pojedynczej cząstki materiału odspojona do czasu t
 $\bar{m}(t) = M(t)/n(t)$,

Założmy, że T_p jest stochastyczną zmienną losową, która określa czas pomiędzy dwoma następującymi po sobie odspojeniami cząstek materiału.

Dystrybuanta tej zmiennej czasowej jest wyrażona wzorem:

$$F_p(t) = W_p\{T_p < t\} \quad (16)$$

gdzie:

$W_p\{T_p < t\}$ - jest prawdopodobieństwem tego, że T_p przyjmie wartość mniejszą od t (t - dowolna wielkość czasu).

Pochodna dystrybuanty $F_p(t)$ jest gęstością zmiennej T_p i oznaczona jest jako $f_p(t)$.

Założmy, że prawdopodobieństwo $W_p\{t, t + \Delta t\}$ oznacza, że w czasie Δt , a więc w przedziale czasu $(t, t + \Delta t)$ oraz w przedziale czasu $(0, t)$ nie doszło do oderwania cząstek materiału.

Można to opisać przy pomocy reguły Bayes'a;

$$W_p\{t, t + \Delta t\} = \frac{W_p\{T_p \geq t + \Delta t\}}{W_p\{T_p \geq t\}} = \frac{R_p(t + \Delta t)}{R_p(t)} \quad (17)$$

gdzie:

$$W_p\{T_p \geq t\} = 1 - W_p\{T_p < t\} = 1 - F_p(t) = R_p(t)$$

wtedy:

$$Q_p\{t, t + \Delta t\} = 1 - W_p\{t, t + \Delta t\} \quad (18)$$

oznacza prawdopodobieństwo tego, że w czasie Δt nastąpi oderwanie cząstki, ale nie dojdzie do tego zjawiska w przedziale czasu $(0, t)$, to znaczy że:

$$Q_p\{t, t + \Delta t\} = W_p\{t \leq T_p \leq t + \Delta t\} \quad (19)$$

$$Q_p\{t, t + \Delta t\} = 1 - W_p\{t, t + \Delta t\} = 1 - \frac{R_p(t + \Delta t)}{R_p(t)} \quad (20)$$

Po podzieleniu obu stron przez Δt otrzymuje się:

$$\frac{Q_p \{t, t + \Delta t\}}{\Delta t} = \frac{R_p(t) - R_p(t + \Delta t)}{\Delta t} \frac{1}{R_p(t)} \quad (21)$$

Granica wyrażenia (21) przy $t \rightarrow 0$ jest postaci:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{Q_p \{t, t + \Delta t\}}{\Delta t} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{R_p(t) - R_p(t + \Delta t)}{\Delta t} \frac{1}{R_p(t)} = - \frac{R_p'(t)}{R_p(t)} \quad (22)$$

Granice wyrażenia (22) oznaczono jest jako $\lambda_p(t)$ i jest ona intensywnością odrywania się cząstek materiału;

$$\lambda_p(t) = \frac{R_p'(t)}{R_p(t)} \quad (23)$$

Po scałkowaniu wyrażenia (23) otrzymuje się liczbę cząstek materiału, które zostały oderwane do czasu t :

$$\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t - \frac{R_p'(t)}{R_p(t)} dt = - \ln [R_p(t) + C] \Big|_0^t = \left[\ln \frac{1}{R_p(t)} - C \right] \Big|_0^t \quad (24)$$

Ponieważ w czasie $t = 0$ żadna cząstka materiału nie została jeszcze odspojona oraz z definicji wynika, że $R_p(t=0) = 1$ to:

$$R_p(t=0) = 1 - F_p(t=0) = 1 - 0 = 1 \quad (25)$$

więc:

$$0 = \frac{1}{R_p(t=0)} - C = \ln 1 - C = -C \quad (26)$$

to znaczy, że $C = 0$ oraz ilość cząstek oderwanych do czasu t jest równa:

$$n(t) = \ln \frac{1}{R_p(t)} \quad (27)$$

Masa m_i poszczególnych cząstek jest wartością przypadkową. Wartość tą można opisać rozkładem statystycznym o gęstości $f(m, t)$. Można założyć, że masa oderwanych cząstek zmienia się. Średnia wielkość masy cząstki materiału w przedziale czasowym $(0, t)$ może być opisana, jako wartość oczekiwana, następującym równaniem:

$$E(m, t) = \int_0^{\infty} \int_0^t m \cdot t \cdot f(m, t) dm dt \quad (28)$$

Ubytek masy, w przedziale czasu $(0, t)$, jest masą oderwanych cząstek materiału i można ją określić mnożąc ilość oderwanych cząstek przez średnią masę cząstki (wartość oczekiwaną masy cząstki);

$$M(t) = \ln \frac{1}{R_p(t)} E(m, t) = \ln \frac{1}{R_p(t)} \int_0^{\infty} \int_0^t m \cdot t \cdot f(m, t) dm dt \quad (29)$$

Jest to ogólna zależność opisująca masę materiału odspojoną do czasu t .

Zakłada się, że wielkość odrywanych cząstek zmienia się tylko w ściśle określonych granicach. W związku z tym rozkład statystyczny wielkości cząstek jest niezależny od czasu ich odrywania się i pozostaje stały. Następnie można przyjąć założenie, że średnia wielkość i średnia masa cząstek podczas odrywania się jest stała, więc:

$$E(m, t) = \text{const.} = m_a \quad (30)$$

Masa oderwanego materiału do czasu t wyraża się zatem równaniem:

$$M(t) = m_a \ln \frac{1}{R_p(t)} = m_a \ln \frac{1}{1 - F_p(t)} \quad (31)$$

W celu określenia masy oderwanego materiału, zgodnie z równaniem (31), wystarczy znać wartości m_a oraz $F_p(t)$. Rozkład statystyczny opisujący przerwy czasowe pomiędzy następującymi po sobie oderwaniami materiału nie jest do tej pory znany. W [66] proponuje się opisać ten rozkład jako podobny do lognormalnego rozkładu o dystrybucie $F_p(t)$ równej:

$$F_p(t) = 1 - \exp[-\{\lambda_p [\ln(t+1)]^{\alpha_p}\}] \quad (32)$$

gdzie:

λ_p i α_p są parametrami rozkładu.

Gęstość tego rozkładu spełnia wymagania matematyczne (wymagania, że określona funkcja jest gęstością rozkładu)

$$1. f_p(t) \geq 0 \quad (33)$$

$$2. \int_0^{\infty} f_p(t) dt = 1 \quad (34)$$

zatem:

$$1. f_p(t) \geq 0, \quad (35)$$

$$2. \int_0^{\infty} f_p(t) dt = F_p(t) \Big|_0^{\infty} = 1 - e^{-\lambda_p [\ln(t+1)]^{\alpha_p}} \Big|_0^{\infty} = 1 \quad (36)$$

Masa oderwanego materiału przy zastosowaniu rozkładu opisanego równaniem (32) [66] jest równa:

$$\begin{aligned} M(t) &= m_a \ln \frac{1}{R_p(t)} = m_a \ln \frac{1}{1 - F_p(t)} = \\ &= m_a \ln \frac{1}{1 - 1 + \exp\{-\lambda_p [\ln(t+1)]^{\alpha_p}\}} = \\ &= m_a \ln \exp\{\lambda_p [\ln(t+1)]^{\alpha_p}\} = m \lambda_p [\ln(t+1)]^{\alpha_p} \end{aligned} \quad (37)$$

po wprowadzeniu oznaczenia:

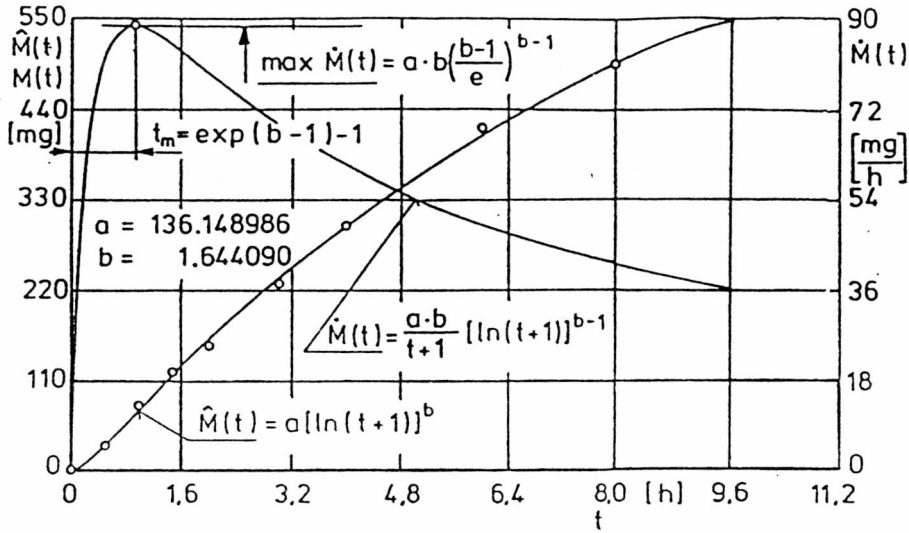
$$m \lambda_p = a, \quad \alpha_p = b \quad (38)$$

otrzymuje się:

$$M(t) = a [\ln(t+1)]^b \quad (39)$$

Na rys. 6 przedstawiono przykładowy przebieg kinetyki zużycia kawitacyjnego opisanego równaniem (39) oraz intensywności zużycia $\dot{M}(t)$ przy czym intensywność zużycia jest równa:

$$M(t) = \frac{a \cdot b}{t + 1} [\ln(t + 1)]^{b-1} \quad (40)$$



Rys. 6. Kinetyka zużycia oraz jej intensywność opisane równaniami (39) i (40).

Wartości współczynników a i b określa się na podstawie opracowania wyników pomiarów wartości zużycia. Można to zrealizować stosując analizę regresji. W tym celu model (39) logarytmuje się obustronnie otrzymując:

$$\ln M(t) = \ln a + b \ln [\ln(t + 1)] \quad (41)$$

Po podstawieniu jako:

$$\ln M(t) = y; \quad \ln a = b_0; \quad b = b_1; \quad \ln[\ln(t + 1)] = x \quad (42)$$

otrzymuje się bardzo wygodne równanie liniowe:

$$y = b_0 + b_1 x \quad (43)$$

Pomiary masy odspojonego materiału wykonuje się stosując najczęściej qusi-ciągłą izotopową metodę pomiarową [68]. Mierzy się sumaryczny ubytek masy M_i po czasie t_i . Zmierzone wartości można zestawzić w postaci dwóch wektorów $\mathbf{M}$ oraz $\mathbf{t}$.

$$\mathbf{M} = [M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_j]^T \quad M_{i-1} < M_i \quad (44)$$

$$\mathbf{t} = [t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_j]^T \quad t_{i-1} < t_i \quad (45)$$

Korzystając z (43) otrzymuje się:

$$\bar{X} = \{\ln[\ln(t_1 + 1)], \ln[\ln(t_2 + 1)], \dots, \ln[\ln(t_i + 1)], \dots, \ln[\ln(t_j + 1)]\}^T \quad (46)$$

$$Y = [\ln M_1, \ln M_2, \dots, \ln M_i, \dots, \ln M_j]^T \quad (47)$$

Tworzy się:

$$X = \begin{vmatrix} 1 & \ln[\ln(t_1 + 1)] \\ 1 & \ln[\ln(t_2 + 1)] \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \ln[\ln(t_i + 1)] \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \ln[\ln(t_j + 1)] \end{vmatrix} \quad (48)$$

otrzymując wartości b_0 oraz b_1 :

$$\begin{vmatrix} b_0 \\ b_1 \end{vmatrix} = \mathbf{b} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (49)$$

Po podstawieniu wartości wektorów $\mathbf{b}$ oraz $\mathbf{t}$ otrzymuje się estymator $\hat{\mathbf{M}}$, czyli wektor obliczonych przy pomocy modelu wartości zużycia masowego. Następnym krokiem jest analiza wariancji i wyznaczenie współczynnika korelacji wielowymiarowej R^2 [41] pomiędzy wartościami wyjścia modelu i obiektu badań. W przypadku dobrego dopasowania modelu do wyników badań oblicza się na wartości współczynników a i b korzystając z zależności (42).

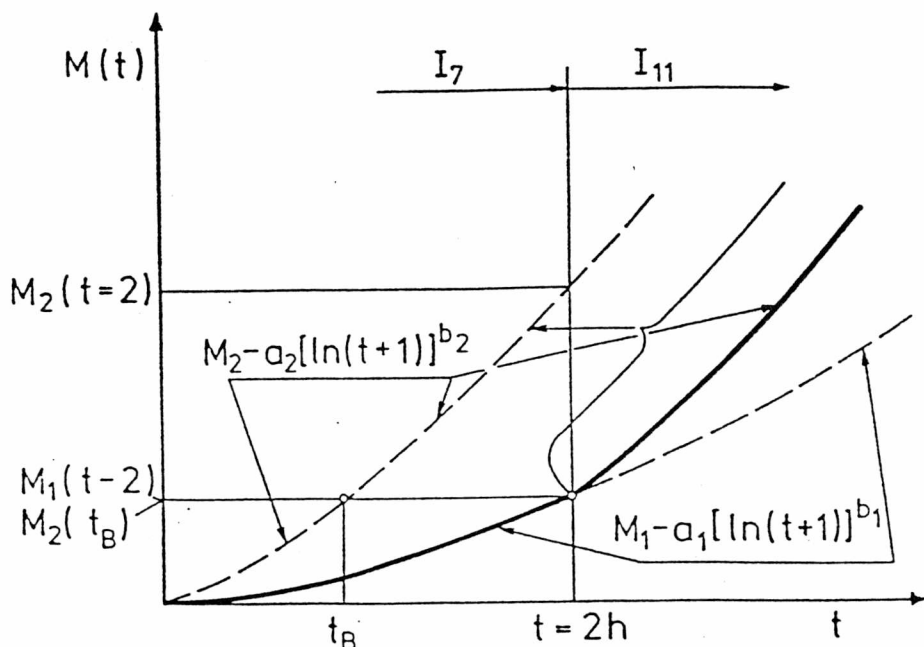
Czas pomiędzy poszczególnymi odspojeniami cząstek może być opisany różnymi typami rozkładów statystycznych (choćby Poissona). Zmiana wartości wymuszeń powoduje zmianę czasu pomiędzy odspojeniami cząstek, a tym samym zmienia się charakter rozkładu opisującego ten czas. Znajduje to odzwierciedlenie w wartości współczynników a i b równania (39).

Sytuację taką przedstawiono na rys. 7. Po pewnym czasie nastąpiła zmiana wartości wymuszeń. Zużycie masowe może przebiegać w tym przypadku według krzywej opisanej równaniem:

$$M_1(t) = a_1 [\ln(t + 1)]^{b_1} \quad (50)$$

oraz równaniem:

$$M_2(t) = a_2 [\ln(t + 1)]^{b_2} \quad (51)$$



Rys. 7. Hipotetyczny przebieg zużycia masowego przy zmianie wymuszeń w punkcie czasu $t = 2h$ [66].

Założono, że zużycie przebiega zawsze wg tego samego prawa w różnych materiałach i przy różnych intensywnościach [66]. Oparte ono zostało na tym, że w czasie dt ($dt \rightarrow 0$) odpajana jest tylko jedna cząstka oraz wszystkie przerwy czasowe pomiędzy odspojeniami, mają taki sam rozkład statystyczny.

W punkcie czasowym t (tutaj $t = 2h$) zmieniają się warunki z warunków opisanych równaniem (50) na opisane równaniem (51). Z rys. 7 widać, że ubytek masy zarejestrowany przy warunkach (50) po czasie $2h$, w warunkach (51) zostałby osiągnięty wcześniej w punkcie czasu t_B . Przebieg zużycia masowego w punkcie czasu t ulega zmianie na przesunięty z punktu t_B do punktu t według krzywej opisanej równaniem (51) [66]. Z tego faktu wynika, że:

$$M_2(t_B) = M_1(t=2h) = M = a_2 [\ln(t_B + 1)]^{b_2} \quad (52)$$

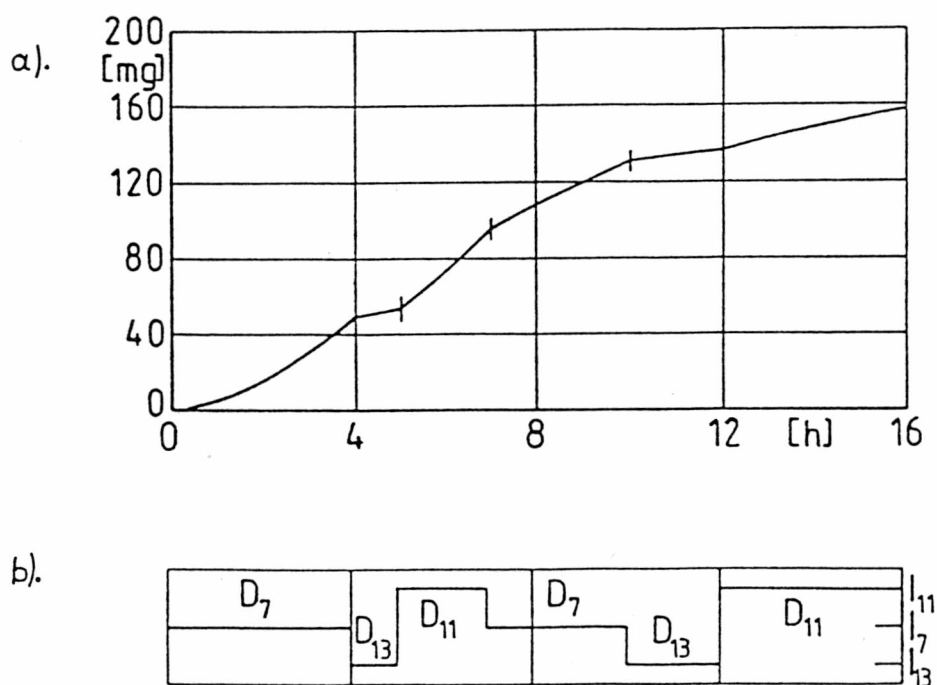
oraz:

$$\sqrt[b]{\frac{M}{a_2}} = \ln(t_B + 1) \quad (53)$$

$$t_B = \exp \sqrt[b]{\frac{M}{a_2}} - 1 \quad (54)$$

Takie obliczenia mogą być prowadzone dalej, gdy wartości współczynników a i b oraz osiągnięte zużycie masowe w etapie pierwszym są znane, zanim nastąpi zmiana intensywności zużycia.

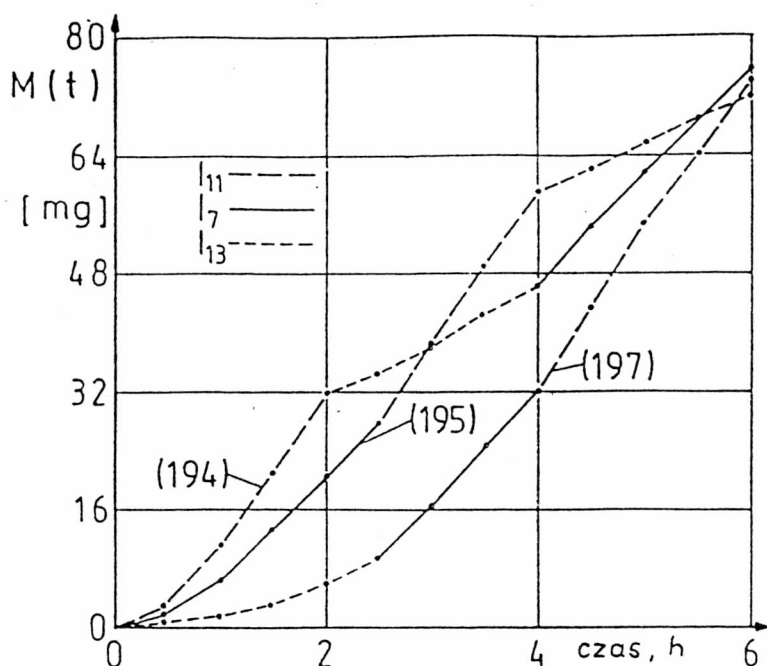
Rozwinięciem powyższej jest sytuacja przedstawiona na rys. 8. Założono, że proces zużycia przebiega przy trzech różnych intensywnościach (rys 8b), zmieniających się w czasie w sposób uporządkowany (np. maszyna pracująca w określonym cyklu). W efekcie powodują one różne, cząstkowe przebiegi procesu zużycia (rys.8a). Otrzymana na rys. 8a krzywa kinetyki zużycia powstała w oparciu o postępowanie przedstawione na rys. 7.



Rys. 8. Zmieniające się intensywności zużycia i przebieg procesu zużycia modelowanego przy pomocy równania (39) [66].

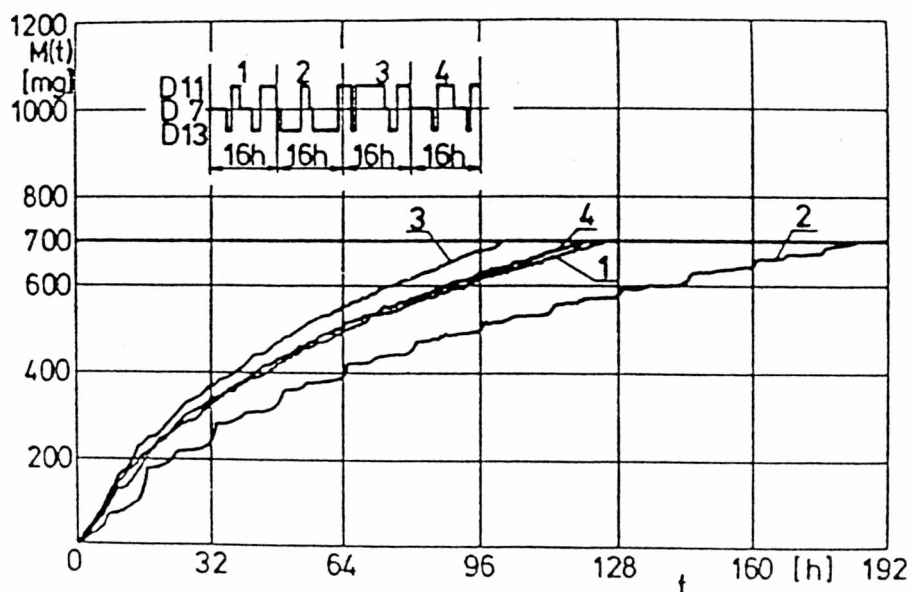
a). Sumaryczny przebieg kinetyki zużycia.

b). Zmieniające się intensywności obciążeń.



Rys. 9. Zbliżone końcowe wartości zużycia przy zmieniających się intensywnościach obciążeń dla różnych prób [66].

W pracy [66] przeprowadzono badania polegające na kilkakrotnym zużywaniu różnych próbek materiałowych o tym samym składzie w cyklach powtarzających się zmiennych intensywności obciążenia. Intensywności obciążeń powtarzały się w różnej kolejności. Początkowo różne wartości zużyć w efekcie końcowym dały bardzo zbliżone rezultaty (rys. 9).



Rys. 10. Przebieg zużycia masowego przy różnych wartościach wymuszeń [66].

To dowodzi, że jeżeli znane są cząstkowe przebiegi krzywych zużycia przy różnych warunkach, to możliwe jest obliczenie sumarycznego przebiegu kinetyki zużycia również wtedy, gdy warunki podczas zużycia nie są stałe. Fakt ten umożliwia prognozowanie wartości zużycia [66].

Na rys. 10 przedstawiono zużycia masowe przy różnych cyklach obciążeń i zmiennych intensywnościach. Na podstawie wcześniej zacytowanych rozważań stwierdzono, że zarówno przy zmiennej, jak i stałej intensywności kavitacji, zużycie masowe osiąga pewną wartość asymptotyczną. Wartość ta rośnie wraz ze wzrostem udziału czasu z intensywną kavitacją.

Stwierdzenie podobnego przebiegu kinetyki zużycia w węzle TPC stworzyłoby podstawy do zmiany sposobu jego identyfikacji.

Omówiony model [66] dotyczy kinetyki zużycia obiektu o zdeterminowanych obciążeniach, natomiast model proponowany w pracy [48] o obciążeniach losowych. Dotyczy on bardzo dużej grupy maszyn między innymi podzespołów pojazdów samochodowych i silników spalinowych. W szczególności w polu zainteresowań autora znalazł się węzeł TPC z parą trącą tuleja cylindrowa - pierścienie tłokowe.

Stworzony w pracy [48] model ujmuje względy niejednakowej odporności indywidualnej obiektów podczas tarcia, oraz chwilowe wahania intensywności zużywania w czasie pracy [48].

W dotychczas rozpatrywanych modelach przyjmuje się monotoniczny przebieg uśrednionych względem czasu realizacji procesu, oznacza to założenie jednakowej wrażliwości układu na wymuszenia zewnętrzne podczas całego cyklu jego eksploatacji. Założenie takie częstokroć mija się z prawdą. Dotyczy to zwłaszcza pary trącej tuleja cylindrowa - pierścienie tłokowe, w której dużą rolę odgrywają takie czynniki jak: zwiększająca się wartość luzu, zmiana własności oleju smarującego i inne.

W procesie zużywania się występuje zjawisko fluktuacji wartości zużycia tłumaczone w bardzo różnorodny sposób. W modelu przedstawionym w pracy [48], podejmuje się próbę nowej interpretacji fizycznej zjawiska fluktuacji jako odwracalnych zmian intensywności zużywania charakteryzujących samoregulującą reakcję układu tribologicznego na zmiany wymuszeń zewnętrznych. Ogólna postać modelu proponowanego w pracy [48] przedstawia się następująco:

$$Z_t = G_t^o(W, m_w, m_v, t) + \Psi_{\omega t}^o(U_{\omega t}, m_w, t) + \Psi_{rt}^o(U_{rt}, m_w, t) \quad (55)$$

gdzie:

- Z_t - niestacjonarny proces stochastyczny opisujący rzeczywisty przebieg zużycia do chwili t ,
- G_t - proces stochastyczny, którego realizacje są monotonicznymi funkcjami czasu. Proces ten opisuje przebieg uśrednionych w czasie realizacji zużycia; nazwany procesem przenoszenia zużycia,
- $\Psi_{\omega t}$ - proces stochastyczny o realizacjach okresowych, opisujący cykliczne odchylenia zużycia od wartości wyznaczonych przez proces przenoszenia; nazwany procesem okresowych fluktuacji zużycia,
- Ψ_{rt} - proces stochastyczny o realizacjach losowo zmiennych w czasie, opisujący odchylenia zużycia od wartości wyznaczonych przez sumę procesu przenoszenia fluktuacji okresowych; nazwany procesem losowych fluktuacji zużycia,
- t - czas zawarty w przedziale od chwili zakończenia docierania do chwili niodwracalnej destabilizacji wewnętrznych warunków pracy układu tribologicznego, $t \in [t_p, t_m]$.

Dodatkowym założeniem jest, że zmienne G_t , $\Psi_{\omega t}$, Ψ_{rt} są wzajemnie niezależne dla każdego ustalonego $t \geq 0$.

Analizując poszczególne składniki modelu zredukowano jego postać do następującego sformułowania [48]:

$$Z_t = Z_0 + Vt + \int_0^t A_z \sin(\omega t_s + \Phi_z) dt_s + \sum_{i=1}^{n_r} \Delta \Psi_r(t_i) \quad (56)$$

gdzie:

- Z_0 , V są wzajemnie niezależnymi zmiennymi losowymi o rozkładzie normalnym oraz niezależnymi od czasu,
- $A_z \sin(\omega t + \Phi_z)$ jest jednorodnym procesem stacjonarnym o realizacjach okresowych, w których faza początkowa Φ_z jest zmienną losową o rozkładzie równomiernym w przedziale $[0, 2\pi]$,
- $\Delta \Psi_r(t_i)$ jest jednowymiarowym normalnym procesem stacjonarnym o zerowej wartości oczekiwanej oraz o realizacjach losowo zmiennych,
- t jest czasem $t \in [t_p, t_m]$, $t \geq 0$,
- t_i są chwilami losowych zmian przebiegu zużycia,
- $i = 1, 2, \dots, n_r, \dots, n_R$ przy czym n_R jest chwilą czasu t_i w przedziale $[t_p, t_m]$, $t_0 = t_p$,
- t_s jest zmienną całkowania, $0 \leq t_s \leq t$.

Zmienne losowe Z_0 , V , Φ_z , $\Delta\Psi_r(t_i)$ są wzajemnie niezależne, a prawdopodobieństwo wystąpienia ujemnych wartości Z_0 , V oraz ujemnych chwilowych przyrostów zużycia jest pomijalnie małe.

Wartość oczekiwana i odchylenie standardowe procesu zużycia opisanego zależnością (56) wynosi [48]:

$$m_z(t) = m_{z_0} + m_v t \quad (57)$$

$$\sigma_z^2(t) = \sigma_{z_0}^2 + \sigma_v^2 t^2 + \sigma_\omega^2 + \sigma_{\Delta r}^2 t_r \quad (58)$$

Funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa $f_{z_t}(z)$ jest równa splotowi gęstości $f_{g_t}(g)$ procesu przenoszenia oraz łącznej gęstości $f_{\Psi_t}(\Psi)$ procesu fluktuacji okresowych i losowych:

$$f_{z_t}(z) = f_{g_t}(g) * f_{\Psi_t}(\Psi) \quad (59)$$

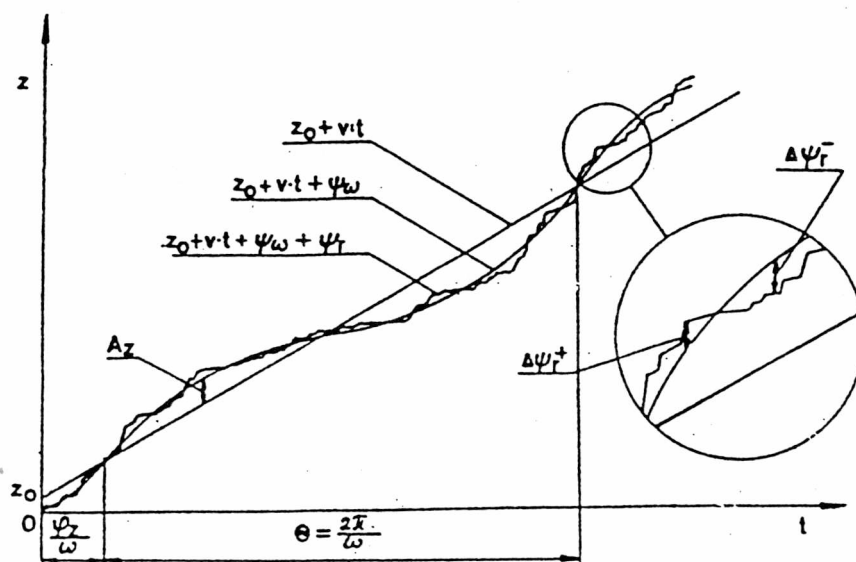
gdzie $*$ oznacza operację splotu, a funkcje gęstości $f_{g_t}(g)$ i $f_{\Psi_t}(\Psi)$ wyrażają się następującymi zależnościami:

$$f_{g_t}(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\sigma_{z_0}^2 + \sigma_v^2 t^2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(g - m_{z_0} - m_v t)^2}{\sigma_{z_0}^2 + \sigma_v^2 t^2} \right] \quad (60)$$

$$f_{\Psi_t}(\Psi) = \frac{1}{\sqrt{\sigma_{\Delta r}^2 t_r} \pi \sqrt{2\pi}} \int_0^\pi \exp \left[-\frac{(\Psi - A_z \cos \phi)^2}{16\sigma_{\Delta r}^2 t_r} \right] \quad (61)$$

Analiza funkcji gęstości (59) pozwala wysnuć wnioski o tym, że posiada ona charakter zdeformowanego rozkładu normalnego [48]. Deformacja ta polega na spłaszczeniu rozkładu. Jej wielkość jest uzależniona od wpływu fluktuacji okresowych. Spłaszczenie rozkładu zużycia jest tym silniejsze, im większy jest stosunek wariancji $\sigma_\omega^2 / (\sigma_v^2 t^2)$, tzn im większe są cykliczne zmiany wymuszeń eksploatacyjnych w porównaniu do różnic indywidualnej wrażliwości obiektów na zużywanie.

Na rys. 11 przedstawiono schemat realizacji niestacjonarnego procesu zużycia według omawianego modelu.



Rys. 11. Schemat niestacjonarnego procesu zużycia według modelu zaproponowanego w pracy [48].

Model procesu zużycia zaproponowany w pracy [48] stanowi sumę trzech składowych: procesu przenoszenia, procesu fluktuacji okresowych i procesu fluktuacji losowych. Znaczenie fizyczne poszczególnych elementów jest następujące:

- proces przenoszenia opisuje uśredniony przebieg zużycia w czasie,
- proces fluktuacji okresowych opisuje cykliczne odchylenia zużycia względem przebiegu uśrednionego,
- proces fluktuacji losowych opisuje odchylenia zużycia względem sumy przebiegu uśrednionego i odchyleni okresowych występujące w przypadkowych chwilach czasu.

Charakterystyki tych procesów są uzależnione od właściwości układu tribologicznego oraz od charakterystyk wymuszeń zewnętrznych.

Model procesu zużycia zaproponowany w pracy [48] uważam za dobrze opisujący przebieg procesu zużycia, uwzględniający zarówno okresowość zużycia charakterystyczną dla węzła TPC oraz przypadkowe przyrosty zużycia.

Reasumując, istnieje szereg modeli matematycznych opisujących przebieg procesu zużycia. Najlepiej dopasowanym do charakteru oraz warunków pracy węzła tarcia TPC jest model opisany w pracy [48]. Godnym uwagi jest zaprezentowany w pracy [66] opis mechanizmu zużywania się oraz zaproponowany model procesu zużycia kawitacyjnego. Przeniesienie opisu kinetyki na zużycie materiałowe zmienia jego przebieg w stosunku do opisów proponowanych dotychczas. Szczególne różnice zauważa się w początkowej fazie procesu. Ponadto brak wyraźnego odcinka, który można by przybliżyć linią prostą (rys. 1 - II okres). Cykliczne zmiany intensywności zużywania się powodują w efekcie przebieg kinetyki przedstawiony na rys. 10 (wg modelu (39)). Ponadto kinetyka zużycia zmierza do pewnych wartości asymptotycznych. Podobny przebieg kinetyki zużycia jest efektem modelu przedstawionego w pracy [48] (rys.11). Dowodzi to celowości prac zmierzających do przeniesienia modelu (39) na zużycie węzła TPC.

2.5. Interpretacja wyników pomiarów wartości zużycia.

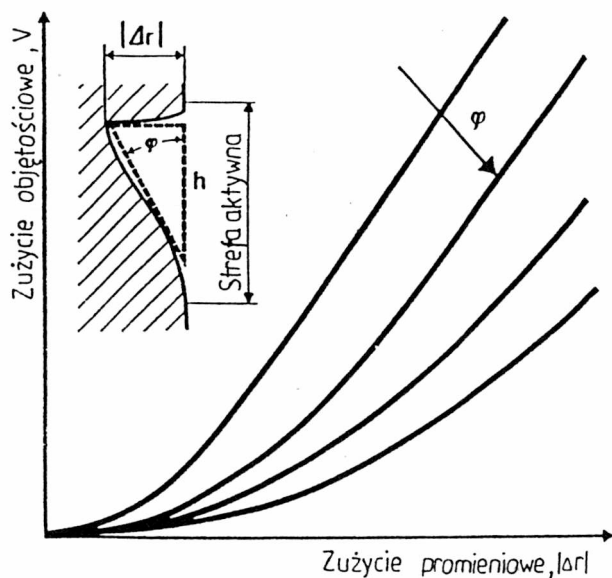
Pomiary wartości zużycia mogą być wykonywane wieloma metodami. Należą do nich pomiary geometryczne, wagowe, sztucznych baz, chemiczne, izotopowe. Wyniki tych pomiarów to:

- zużycie liniowe będące różnicą wymiarów liniowych,
- zużycie masowe będące różnicą masy,
- zużycie objętościowe będące różnicą objętości.

Zużycie masowe i objętościowe są ze sobą powiązane przez ciężar właściwy zużywającego się materiału.

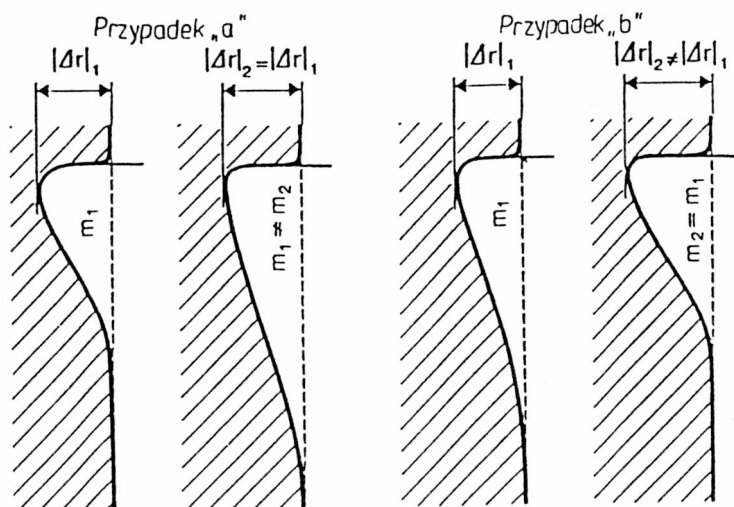
Istnieją duże trudności w powiązaniu zużycia masowego lub objętościowego z zużyciem liniowym. Dla przykładu rozpatrzono zużycie objętościowe i liniowe w GMP pierwszego pierścienia tłokowego tulei cylindrowej (rys. 12). Zużycie tulei przedstawiono w uproszczeniu jako trójkąt prostokątny w jej przekroju o przyprostokątnych Δr i h z kątem rozwarcia ϕ jako parametrem. Wspomniane trudności w interpretacji wyników pomiarów objętościowych wynikają z tego, że podczas pracy silnika, nie znana jest rzeczywista, aktualna wartość kąta ϕ oraz wysokość h . Czyli mając dane wyniki pomiarów zużycia objętościowego,

otrzymane np. metodą izotopową, nie sposób ustalić rzeczywistej wartości zużycia liniowego (Δr na rys. 12).



Rys. 12. Zużycie objętościowe tulei cylindrowej w funkcji jej zużycia liniowego w GMP [46].

Na rys. 13 przedstawiono dwie sytuacje. Po pierwsze gdy zużycie liniowe jest takie samo ($\Delta r_1 = \Delta r_2$), a zużycie objętościowe zupełnie różne, oraz gdy zużycie objętościowe jest takie samo, a zużycie promieniowe różne.



Rys. 13. Przykładowe postaci zużycia tulei cylindrowej w GMP pierwszego pierścienia tłokowego [46].

Reasumując metody pomiaru wartości zużycia, których wynikiem jest zużycie masowe lub objętościowe nastroczają wielu problemów z ich interpretacją. Stosowanie tych metod umożliwia jednak ciągły lub quasi-ciągły pomiar zużycia, co ma istotne znaczenie podczas określenia momentu zakończenia procesu docierania pary trącej.

Dla węzła TPC najważniejsze jest określenie zużycia liniowego jego elementów. Często elementy węzła TPC, w szczególności tuleja cylindrowa i pierścien tłokowy, posiadają specjalnie wykonane warstwy wierzchnie o zwiększonej odporności na zużycie (np. chromowane). Grubości tych warstw są małe (np. warstwa chromu na tulejach cylindrowych jest grubości 50 μm). Usunięcie, choćby miejscowe warstwy np. chromowanej, eliminuje element z dalszej eksploatacji. Informację na ten temat może dostarczyć wyłącznie bezpośredni pomiar zużycia liniowego, lub ściśle powiązanie wyników pomiarów zużycia objętościowego z zużyciem liniowym.

Z uwagi na przytoczone wyżej fakty pomiary zużycia wykonywane w ramach niniejszej pracy ograniczono do pomiarów zużycia liniowego.

3. IDENTYFIKACJA MIKROGEOMETRII WARSTWY WIERZCHNIEJ TULEI CYLINDROWYCH.

3.1. Szczegółowy opis mikrogeometrii warstwy wierzchniej tulei cylindrowej.

Zgodnie z definicją zaczerpniętą z [23]: "Warstwa wierzchnia (WW) to warstwa materiału ograniczona zewnętrzną (rzeczywistą) powierzchnią przedmiotu (wyrobu) zawierająca tę powierzchnię oraz część materiału w głąb od tej powierzchni, wykazująca zmienione cechy fizyczne, a niekiedy i chemiczne, w stosunku do pozostałego materiału w głębi przedmiotu (rdzenia materiału)".

Proces technologiczny, w wyniku którego powstaje wyrób o wymaganym kształcie, powoduje jednocześnie utworzenie warstwy wierzchniej o określonych cechach. Cechy te są uzależnione od warunków realizacji tego procesu. Procesy te powinny być tak projektowane, żeby umożliwić powstanie warstwy wierzchniej o wymaganej dokładności wymiarowo - kształtowej i cechach optymalnych ze względu na własności użytkowe wyrobów, w tym wymaganą odporność na zużycie ścierne i zmęczeniowe.

Można to osiągnąć przez odpowiednie konstytuowanie warstwy wierzchniej co matematycznie można przedstawić w postaci tzw. funkcji konstytuowania warstwy wierzchniej [23]:

$$C = F_w(p_1, \dots, p_l, \dots, p_{i_t}) \quad (62)$$

gdzie:

C - wielkość charakteryzująca warstwę wierzchnią,

($w = 1, 2, \dots, i_w$),

p_l - wielkość charakteryzująca proces technologiczny,

($l = 1, 2, \dots, i_t$).

Funkcje konstytuowania warstwy wierzchniej są wyznaczane na podstawie badań doświadczalnych prowadzonych dla podstawowych metod wytwarzania, kształtów wyrobów oraz materiałów. Wyznaczone funkcje konstytuowania są wykorzystywane do określania zależności między cechami warstwy wierzchniej a jej własnościami użytkowymi. Jako przykład może posłużyć zależność pomiędzy chropowatością powierzchni otrzymanej w procesie toczenia wyrobu, a jej wytrzymałością zmęczeniową.

Dążąc do zwiększenia trwałości i niezawodności wyrobów, należy określić zbiór oraz zakresy wartości optymalnych cech warstwy wierzchniej, a następnie sprawdzić czy zostały one rzeczywiście uzyskane w procesie wytwarzania.

Warstwa wierzchnia charakteryzuje się:

- strukturą geometryczną powierzchni,
- strukturą fizyczno - chemiczną materiału.

Struktura geometryczna powierzchni warstwy wierzchniej jest charakteryzowana w ujęciu makrogeometrycznym przez falistość powierzchni, a w ujęciu mikrogeometrycznym przez jej chropowatość.

Typowa struktura geometryczna powierzchni warstwy wierzchniej tulei cylindrowej została przedstawiona na rys. 14, w postaci tzw. profilu chropowatości powierzchni tulei cylindrowej [34], [35].

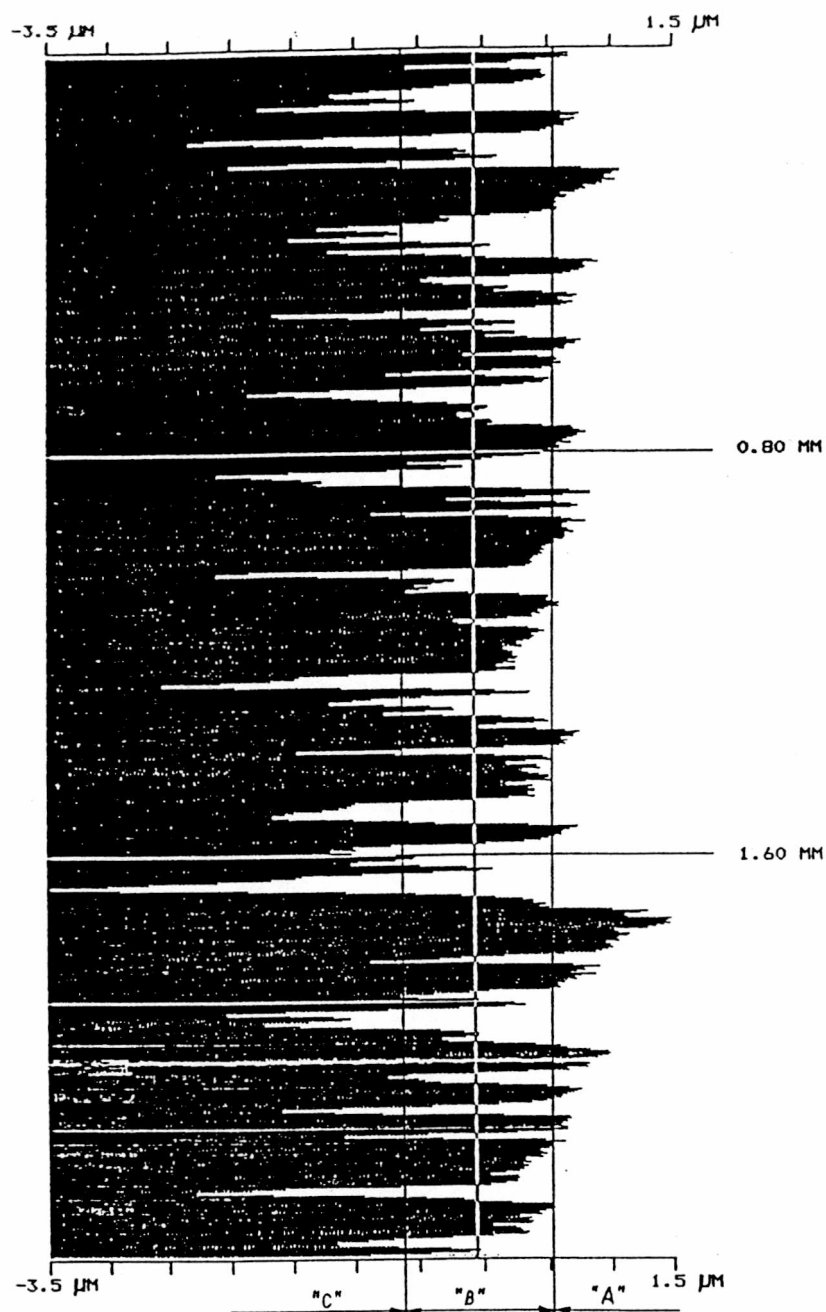
Profil ten został wyznaczony przy pomocy profilometru umożliwiającego pomiar parametrów opisujących strukturę warstwy wierzchniej, sprzężonego z mikrokomputerem i drukarką. Pomiar wykonano na seryjnej chromowanej tulei produkcyjnej. Powiększenie w kierunku pionowym do powierzchni warstwy wierzchniej tulei jest znacznie większe niż w kierunku równoległym, stąd tak duża deformacja profilu. Cechy charakterystyczne występujące we wszystkich profilach powierzchni tulei cylindrowych to:

- strefa wierzchołków powierzchniowych - "A",
- faza plateau "B",
- strefa głębokich bruzd "C".

Strefa wierzchołków powierzchniowych obejmuje powierzchnię tulei, utworzoną przez szczyty jej nierówności.

Faza plateau stanowi tzw. powierzchnię nośną tulei cylindrowej. Powstaje po usunięciu strefy wierzchołków powierzchniowych.

Strefa głębokich bruzd jest charakterystyczną strefą występującą w warstwie wierzchniej tulei cylindrowych. Jest ona utworzona przez szereg głębokich zarysowań.



Rys. 14. Profil chropowatości powierzchni warstwy wierzchniej tulei cylindrowej.

Granice pomiędzy poszczególnymi strefami są trudne do określenia. Szczyty nierówności ulegają ścięciu w procesie docierania silnika. Faza plateau ulega procesowi zużycia podczas eksploatacji tulei cylindrowej. Proces ten byłby znacznie przyspieszony, gdyby nie było tzw. strefy głębokich bruzd. Zadaniem strefy głębokich bruzd jest zatrzymywanie oleju smarującego na powierzchni tulei cylindrowej i, dzięki temu, pomoc w utrzymywaniu ciągłości filmu olejowego.

3.1.1. Metody opisu struktury geometrycznej warstwy wierzchniej.

Chropowość powierzchni wyznaczana jest przy pomocy metod:

I. Analizy profilów zdeterminowanych traktowanych jako przebiegi zdeterminowane. Podanie wartości parametrów chropowości następuje po:

- pomiarze profilu chropowości geometrycznej warstwy wierzchniej i zastosowaniu odpowiednich wzorów definicyjnych określających parametry chropowości,
- modelowaniu geometrycznym profilu chropowości.

II. Analizy profilów stochastycznych traktowanych jako realizacje procesów stochastycznych.

Metody analizy profilów zdeterminowanych polegają na zrealizowaniu właściwych pomiarach bezpośrednich za pomocą przyrządów pomiarowych (profilometrów i profilografometrów) oraz obliczeniu na podstawie wzorów definicyjnych wartości parametrów chropowości.

Modelowanie geometryczne profilu chropowości powierzchni polega na wykorzystaniu tzw. geometryczno - kinematycznego odwzorowania kształtu i ruchu ostrza narzędzia kształtującego chropowość powierzchni. Zastosowanie obliczonych parametrów, na podstawie tak sporządzonego profilu chropowości powierzchni, zwanego teoretyczną chropowością powierzchni, jest ograniczone z uwagi na problematyczną adekwatność otrzymanego modelu z rzeczywistym profilem powierzchni.

Metody analizy profilów stochastycznych polegają na analizie stochastycznej profilu chropowości i wymagają przyjęcia zweryfikowanego doświadczalnie założenia o pewnych cechach profilu jako realizacji procesu stochastycznego, np. stacjonarności, ergodyczności i normalności. Wyznaczanie wartości wielu parametrów profilu chropowości powierzchni przeprowadza się wykorzystując pojęcie funkcji autokorelacji (FAK). Postępowanie takie nazywa się wyznaczaniem parametrów chropowości metodą FAK.

Szczególą odmianą metody FAK jest tzw. metoda punktów szczególnych profilu chropowości (PS) opracowana pod kątem zastosowań praktycznych.

Techniki pomiarowe stosowane w przypadku korzystania z metod FAK i PS polegają na rejestracji profilu na nośniku magnetycznym bądź w

pamięci komputera i następnie analitycznym wyznaczaniu wartości parametrów profilu chropowatości.

3.1.1.1. Metody analizy profilów zdeterminowanych.

Najbardziej obecnie rozpowszechnionym jest opis chropowatości powierzchni za pomocą jej parametrów. W praktyce stosowanych jest kilka z nich jako podstawowe. Najczęściej stosowanym parametrem jest średnie arytmetyczne odchylenie profilu powierzchni R_a [56]. Często podawana jest również wartość parametru R_z (wysokość chropowatości wg 10 punktów) [56]. Jednakże parametry te nie opisują jednoznacznie struktury geometrycznej powierzchni [74], [1]. Powierzchnie o zbliżonych wartościach parametrów R_a i R_z mogą się różnić w bardzo istotny sposób wpływający na późniejszą ich współpracę. W Polskich Normach [57] oraz w normach międzynarodowych [28] określonych jest 28 parametrów chropowatości powierzchni. Nowoczesne profilografometry umożliwiają identyfikację jeszcze większej ich liczby.

Przyrządy te analizują profil powierzchni w płaszczyźnie do niej prostopadłej, co stanowi bardzo poważne ograniczenie tej metody pomiarowej. Można to ograniczenie obejść stosując pomiar profilometrem w szeregu równoległych do siebie płaszczyznach pomiarowych i w ten sposób przybliżyć cechy stereometryczne. Podobny efekt można uzyskać mierząc profile powierzchni w płaszczyznach do siebie prostopadłych, a wyniki pomiarów opisywać w oparciu o teorię procesów losowych.

Parametry profilu powierzchni można podzielić na:

- wertykalne (pionowe),
- horyzontalne (poziome) oraz,
- hybrydowe (mieszane) [74].

W praktyce chropowatość powierzchni charakteryzuje się prawie wyłącznie za pomocą parametrów wertykalnych.

Najprostszymi parametrami wertykalnymi profilu są miary wysokości nierówności:

- maksymalna wysokość wzniesienia profilu chropowatości R_p ,
- maksymalna głębokość wgłębienia profilu chropowatości R_v ,
- maksymalna wysokość chropowatości R_m .

Parametry te są wrażliwe na pojedyncze występy czy wgłębienia, które są nieistotne z punktu widzenia oddziaływań tribologicznych. Jest to poważną wadą tych parametrów. Istnieje parametr o zmniejszonej wrażliwości na pojedyncze wgłębienia i występy tj. wysokość chropowatości wg dziesięciu punktów; pięciu najwyższych wzniesień i pięciu najniższych wgłębień profilu chropowatości oznaczany R_z . Wadą tych parametrów profilu jest to, że określają one wartości skrajne zmiennej losowej, nie ujmując rozkładu rzędnych pomiędzy najwyższym i najniższym punktem profilu. Może zaistnieć sytuacja, że powierzchnie o zbliżonych wartościach parametrów R_p , R_v , R_m i R_z będą wykazywały różne własności.

Wynikiem pomiaru profilometrem jest rozkład rzędnych profilu powierzchni o znanej dystrybucji (funkcji rozkładu prawdopodobieństwa).

Chropowatość powierzchni jest dokładnie scharakteryzowana w kierunku prostopadłym rozkładem rzędnych (gęstością $f(z)$) lub krzywą nośności (dystrybuantą $F(z)$). Równoznacznym parametrem jest krzywa nośności, którą można zbudować metodą graficzną opierając się na rozkładzie rzędnych profilu powierzchni, lub - co jest możliwe w przypadku nowoczesnych profilografów - wyznaczyć w oparciu o zliczanie liczby dyskretnych punktów profilu w poszczególnych podprzedziałach o zadanej szerokości Δ .

Należy podkreślić, że ani rozkład rzędnych, ani krzywa nośności nie są wskaźnikami chropowatości związanymi z kształtem profilu nierówności, gdyż te parametry funkcyjne zależą wyłącznie od wertykalnych charakterystyk nierówności powierzchni.

Pełne scharakteryzowanie rozkładu rzędnych profilu umożliwia momenty tego profilu. Największe znaczenie jako parametry chropowatości mają momenty centralne rozkładu. Centralny moment bezwzględny rzędu 1 znalazł zastosowanie jako parametr chropowatości. Został on nazwany średnim arytmetycznym odchyleniem profilu R_a . Moment centralny rzędu drugiego jest wskaźnikiem rozrzutu rzędnych profilu (wariancja). W praktyce jest stosowany pierwiastek kwadratowy z wariancji tj. odchylenie standardowe σ ; zwany średnim kwadratowym odchyleniem profilu chropowatości i oznaczany symbolem R_q :

$$R_q = \sigma = \sqrt{\mu_2} \quad (63)$$

Asymetrię rozkładu charakteryzuje moment centralny rzędu trzeciego, nosi on nazwę bezwymiarowego współczynnika skośności profilu chropowatości:

$$R_{sk} = \mu_3 / \sigma^3 \quad (64)$$

Moment centralny rzędu czwartego jest związany ze skupieniem rozkładu (spłaszczeniem) i nosi nazwę kurtozy R_{ku} :

$$R_{ku} = \mu_4 / \sigma^4 \quad (65)$$

W rozkładzie normalnego R_{ku} wynosi 3, przy wartości $R_{ku} < 3$ występuje spłaszczenie rozkładu, a dla $R_{ku} > 3$ rozkład jest wyższy i bardziej wysmukły.

Horyzontalne parametry profilu chropowatości są używane stosunkowo rzadko. Do najczęściej używanych należą średni odstęp chropowatości S_m oraz średni odstęp miejscowych wzniesień profilu S . Dodatkowym parametrem nienormowanym, związanym ze średnim odstępem chropowatości jest jednostkowa liczba przecięć profilu z linią średnią $n(0)$.

Parametrem normowanym jest gęstość wzniesień profilu chropowatości D .

Ponadto stosowane są jako parametry horyzontalne:

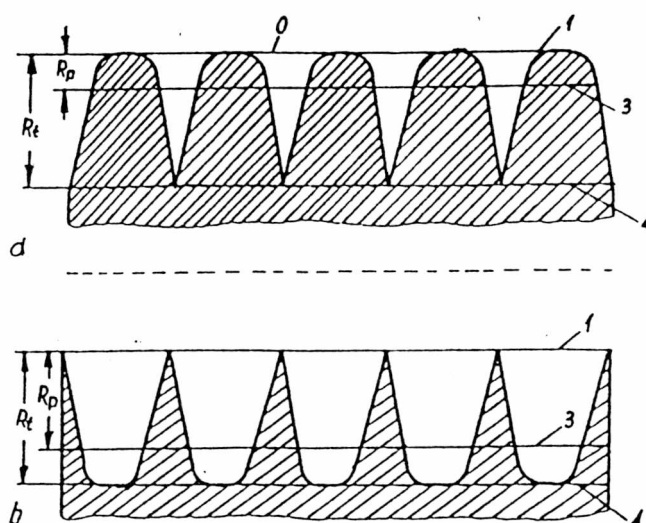
$n(z)$ - jednostkowa liczba przecięć profilu z linią o rzędnej z oraz,
 m - jednostkowa liczba wierzchołków profilu.

Hybrydowe parametry chropowatości nie znalazły szerszego zastosowania w praktyce oceny chropowatości [74].

Wprowadzono szereg niekonwencjonalnych parametrów chropowatości, które miały być istotne z tribologicznego punktu widzenia. Ważną cechą powierzchni jest kształt występow nierówności powierzchni (rys. 15).

Z punktu widzenia tribologicznego korzystna jest chropowatość o szerokich występowach nierówności i płaskich powierzchniach czołowych (rys. 15a). W celu rozróżnienia powierzchni z ostrymi występowami nierówności od powierzchni z ostrymi wgłębieniami (rys. 15b), w pracy [28] zaproponowano zestawienie bezwymiarowych kombinacji (ilorazów) standardowych parametrów wertykalnych. Wskaźniki te nie posiadają zdaniem autora [74] zalet, ponieważ:

- nie mają uzasadnienia fizycznego,
- podlegają znacznemu rozrzutowi w związku z wrażliwością parametrów R_t i R_q na pojedyncze występy nierówności profilu,
- cechy profilu dla których opisanie je wprowadzono można jednoznacznie przedstawić przy pomocy centralnych momentów rozkładu.



Rys. 15. Porównanie profili o różnych kształtach występów mikrogeometrii powierzchni [74].

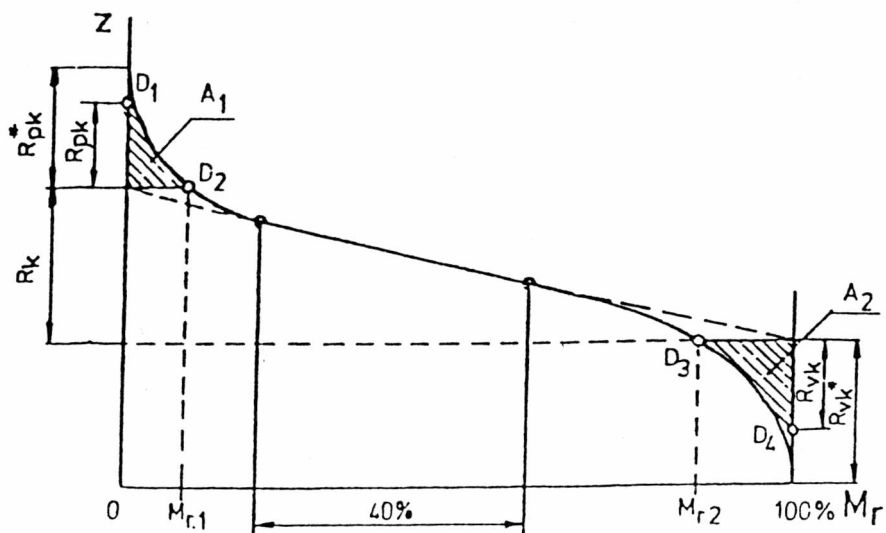
W normie [12] zaproponowano następujące parametry krzywej nośności profilu chropowatości (rys.16):

- R_k - zredukowana wysokość chropowatości [μm],
- R_{pk} - zredukowana wysokość wzniesienia profilu chropowatości [μm],
- R_{vk} - zredukowana wysokość wgłębienia profilu chropowatości [μm],
- M_{r1} - udział materiałowy [%],
- M_{r2} - udział materiałowy [%].

Parametr R_k jest wyznaczony przez sieczną krzywej nośności, która przechodzi przez dwa jej punkty oddalone od siebie o 40% i ma najmniejsze nachylenie (rys. 16), Parametry R_{pk} oraz R_{vk} określa się z powierzchni A_1 i A_2 ;

$$R_{pk} = 2 A_1 / M_{r1} \quad (66)$$

$$R_{vk} = 2 A_2 / (100\% - M_{r2}) \quad (67)$$



Rys. 16. Charakterystyki krzywej nośności wg DIN 4776 [12]
(opis w tekście).

Najważniejszym spośród wyżej wspomnianych parametrów jest zredukowana wysokość chropowatości R_k , określająca wysokość rdzenia profilu, wyznaczona po odrzuceniu najwyższych wierzchołków i najniższych wgłębień powierzchni. Parametr ten koreluje z innymi charakterystykami wertykalnymi profilu [79]. Do wyznaczenia parametru R_k służy sieczna krzywej nośności, która jest styczną do tej krzywej o najmniejszym nachyleniu, czyli w punkcie maksimum pochodnej dystrybuanty $F(z)$, czyli funkcji rozkładu rzędnych profilu chropowatości $f(z)$. Maksimum funkcji rozkładu jest moment centralny rzędu czwartego, czyli kurtoza R_{ku} . W pracy [79] sprawdzono korelację pomiędzy parametrami R_k i R_{ku} . Z analizy wynika mniejsza czułość zredukowanej wysokości chropowatości niż współczynnika skupienia rozkładu.

Pozostaje sprawa ujęcia asymetrii rozkładu, wg normy DIN za taki parametr może posłużyć stosunek R_{pk} / R_{vk} . Z kolei w ujęciu statystycznym parametrem opisującym asymetrię rozkładu jest współczynnik skośności R_{sk} . Porównanie wrażliwości [79] na asymetrię rozkładu stosunku R_{pk} / R_{vk} i współczynnika skośności R_{sk} wykazuje przewagę tego ostatniego.

Reasumując omawiane parametry R_k , R_{pk} , R_{vk} nie wykazują przewagi nad momentami centralnymi rozkładu.

W pracy [78] zaproponowano scharakteryzowanie chropowatości powierzchni ze względu na procesy tribologiczne zachodzące w WW tulei cylindrowej.

Decydujące znaczenie z punktu widzenia smarowania, tarcia i zużycia

węzła TPC, ma objętość oleju, zmagazynowanego we wgłębieniach profilu, odniesiona do jednostki powierzchni; V [$\text{mm}^3 / \text{cm}^2$]. Parametr V jest parametrem przedstawionym w funkcji udziału nośnego profilu, przy czym jego autor decydujące znaczenie przywiązuje do wartości tego parametru dla udziału nośnego profilu $t_p = 60\%$. Parametr ten jest słabo uzasadniony, ponieważ uważa się [78], że korzystne jest ukształtowanie powierzchni z dużymi zasobnikami oleju, co pozostaje w sprzeczności z poprzednio proponowanym ukształtowaniem powierzchni o szerokich występach nierówności z płaskimi powierzchniami, które to ukształtowanie jest równoznacznie z niewielkimi zasobnikami oleju smarującego. Ponadto informacja zawarta w parametrze V jest równoznaczna z informacją zawartą w krzywej nośności wyrażonej w innych jednostkach miary.

3.1.1.2. Metody analizy profilów stochastycznych.

Profilogram chropowatości, w świetle określeń zaczerpniętych z analizy funkcji losowych, jest jedną realizacją procesu losowego. Wykonując nie jeden, lecz wiele profilogramów tworzymy zbiór realizacji stanowiący proces stochastyczny:

$$\{h_j(l); \quad j = 1, \dots, r\} \quad (68)$$

Stosując metody analizy procesów stochastycznych, można analizować modele profilu chropowatości. W tym celu określa się pewne wielkości, do których zalicza się przede wszystkim wartość średnią $\overline{h(l_1)}$ profilu chropowatości powierzchni oraz funkcję autokorelacji $(R(l_1, l_1 + \tau))$, określane dla dowolnej wartości odległości l_1 .

Funkcja autokorelacji dla chropowatości powierzchni jest określana jako funkcja autokorelacji profilu chropowatości powierzchni. W odniesieniu do tego profilu zakłada się stacjonarność procesu stochastycznego opisującego ten profil. Oznacza to, że wartość średnia i funkcja autokorelacji nie zmieniają się wraz ze zmianą argumentu, czyli długości pomiarowej;

$$\begin{aligned} \overline{h(l_1)} &= \bar{h} = h_m \\ R(l_1, l_1 + \tau) &= R(l, l + \tau) = R(\tau) \end{aligned} \quad (69)$$

Procesy stochastyczne modelujące profile chropowatości oprócz

stacjonarności spełniają warunek ergodyczności. Oznacza to, że wartości średnie i funkcje autokorelacji nie różnią się istotnie dla różnych realizacji;

$$\begin{aligned}\bar{h}_j &= \bar{h} \\ R_j(\tau) &= R(\tau)\end{aligned}\tag{70}$$

Ponadto w odniesieniu do profilu chropowatości opisanego procesem stochastycznym zakłada się zwykle dodatkowo, że wysokość profilu jako zmienna losowa ma rozkład normalny.

Wyznaczanie parametrów profilu chropowatości modelowanego procesem stochastycznym odbywa się przy wykorzystaniu dwóch podstawowych metod:

- metody funkcji autokorelacji (FAK),
- metody punktów szczególnych (PS).

Metoda FAK.

Mając do dyspozycji funkcje autokorelacji profilu chropowatości (FAK), można wyznaczyć parametry stałe i funkcyjne tego profilu oraz gęstość widmową mocy, a także ocenić anizotropię powierzchni, czyli praktycznie określić charakterystykę chropowatości powierzchni.

Wyznaczanie wartości parametrów chropowatości metodą funkcji autokorelacji polega na:

- rejestracji profilu chropowatości powierzchni,
- wyznaczeniu funkcji autokorelacji $R(\tau)$ (w postaci unormowanej $\rho(\tau)$),
- aproksymacji unormowanej funkcji autokorelacji $\hat{\rho}(\tau)$,
- wyznaczeniu parametrów profilu uwzględnionych w charakterystyce chropowatości.

W przypadku powierzchni technicznych [74], [47], [80] zakłada się, dla rozważanego stacjonarnego, ergodycznego procesu losowego, wielowymiarowy rozkład normalny:

$$p(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n) = (2\pi)^{-n/2} \Delta^{-1/2} \exp(-1/2 \varepsilon^T K^{-1} \varepsilon)\tag{76}$$

gdzie:

$\varepsilon^T = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$ - wektor zawierający funkcję gęstości powierzchni i jego pochodne cząstkowe,

$\Delta = \det K$ - wyznacznik macierzy kowariancji K , której elementami są:

$$n_{ij} = E(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$$

Analizując przekrój tej powierzchni płaszczyzną do niej prostopadłą; otrzymujemy trzy zmienne losowe:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= z(x) \\ \varepsilon_2 &= dz/dx \\ \varepsilon_3 &= d^2z/dx^2 \end{aligned} \quad (72)$$

Dla profilu powierzchni funkcja autokorelacji (autokowariancji) $R(\tau)$ przy $\tau = x_2 - x_1$ zdefiniowana jest następująco:

$$R(\tau) = \lim_{-L} 1/2L \int_{-L}^L z(x)z(x + \tau)dx = E(z(x_1), z(x_2)) \quad (73)$$

Funkcja autokorelacji dla $\tau = 0$ jest równa wariancji, to znaczy kwadratowi odchylenia standardowego:

$$R(0) = D^2Z = \sigma^2 \quad (74)$$

Gęstość widmowa mocy $G(\omega)$ jest transformatą Fouriera funkcji autokorelacji:

$$G(\omega) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \exp(-i\tau\omega) d\tau \quad (75)$$

Momenty spektralne wynoszą zatem:

$$M_n = \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \omega^n d\omega \quad (76)$$

Macierz kowariancji, dla losowego modelu profilu powierzchni, ma następującą postać:

$$K = \begin{bmatrix} M_0 & 0 & -M_2 \\ 0 & M_2 & 0 \\ -M_2 & 0 & M_4 \end{bmatrix} \quad (77)$$

Po odwróceniu macierzy K otrzymujemy trójwymiarową gęstość prawdopodobieństwa:

$$p(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) = \frac{1}{(2\pi M_2)^{3/2} (\alpha_m - 1)^{1/2}} \exp \left[-1/2 \left[\frac{1}{\alpha_m - 1} \left[\frac{\varepsilon_1^2}{M_0} + \frac{\varepsilon_3^2}{M_4} \right] + \frac{\varepsilon_2^2}{M_2} + \frac{2 \varepsilon_1 \varepsilon_3}{M_2 (\alpha_m - 1)} \right] \right] \quad (78)$$

gdzie α_m jest parametrem szerokości widma mocy;

$$\alpha_m = \frac{M_0 M_4}{M_2^2}$$

Posługując się prawdopodobieństwem $p(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ można wyprowadzić zależność dla różnych parametrów profilu, np.:

- liczba przecięć profilu z linią średnią odniesiona do jednostki długości:

$$E(n(0)) = 1/\pi \sqrt{M_2/M_0}, \quad (79)$$

- liczba wierzchołków profilu przypadająca na jednostkę długości:

$$E(n_{\max}) = 1/2\pi \sqrt{M_4/M_2}. \quad (80)$$

Dla powierzchni elementów maszyn rozpatrywana jest sześciowymiarowa gęstość prawdopodobieństwa ze zmiennymi:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= z(x, y) \\ \varepsilon_2 &= \delta z / \delta x \\ \varepsilon_3 &= \delta z / \delta y \\ \varepsilon_4 &= \delta^2 z / \delta x^2 \\ \varepsilon_5 &= \delta^2 z / \delta x \delta y \\ \varepsilon_6 &= \delta^2 z / \delta y^2 \end{aligned} \quad (81)$$

Funkcja autokorelacji (autokowariancji) ma ogólną postać:

$$R(\tau_x, \tau_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} z(x, y) z(x + \tau_x, y + \tau_y) dx dy \quad (82)$$

Gęstość widmową mocy określa podwójna transformata Fouriera:

$$G(\omega_x, \omega_y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) \exp(-i(\omega_x x + \omega_y y)) dx dy \quad (83)$$

Momenty spektralne zdefiniowane są następująco:

$$M_{pg} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega_x, \omega_y) \omega_x^p \omega_y^g d\omega_x d\omega_y \quad (84)$$

Macierz kowariancji ma w przypadku powierzchni postać:

$$K = \begin{bmatrix} M_{00} & 0 & 0 & -M_{20} & 0 & -M_{02} \\ 0 & M_{02} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{20} & 0 & 0 & 0 \\ -M_{02} & 0 & 0 & M_{40} & 0 & M_{22} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{22} & 0 \\ -M_{02} & 0 & 0 & M_{22} & 0 & M_{04} \end{bmatrix} \quad (85)$$

Wprowadzając dodatkowo warunek izotropii otrzymujemy:

$$M_{00} = M_0 \quad (86)$$

$$M_{02} = M_{20} = M_2 \quad (87)$$

$$M_{04} = M_{40} = 3 M_{22} = M_4 \quad (88)$$

Gęstość prawdopodobieństwa wynosi więc:

$$p(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6) = (2\pi)^{-3} \Delta^{-0.5} \exp(-0,5 x) \quad (89)$$

gdzie:

$$x = 2 M_4 \varepsilon_1^2 / \Delta_1 + 9 \Delta_2 (\varepsilon_4^2 + \varepsilon_6^2) / (2 M_4 \Delta_1) + 3 \varepsilon_5^2 / M_4 + (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)^2 / M_2^2 + \\ + M_2 \varepsilon_1 (\varepsilon_4 + \varepsilon_6) / \Delta_1 - 3 \Delta_3 \varepsilon_4 \varepsilon_6 / (2 M_4 \Delta_1)$$

oraz:

$$\Delta = \det K = 4/27 (2\alpha - 3) M_4^2 \\ \Delta_1 = (2\alpha - 3) M_2^2 \\ \Delta_2 = (\alpha - 1) M_2^2 \\ \Delta_3 = (\alpha - 3) M_2^2$$

Na podstawie prawdopodobieństwa $p(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6)$ mogą być wyznaczone stereometryczne parametry chropowatości, np. jednostkowa liczba wierzchołków powierzchni:

$$E(N_{\max}) = \frac{1}{6\pi (3)^{1/2}} M_4 / M_2 \quad (90)$$

Powierzchnia tulei cylindrowej jest anizotropowa. W tym wypadku koniecznym staje się zdefiniowanie współczynnika anizotropii określającego kierunkowość struktury mikrogeometrycznej.

Wprowadzono kilka różnych wskaźników anizotropii. Longuet-Higgins [40] wprowadził jako wskaźnik anizotropii parametr długości fali:

$$\gamma_{LH} = (M_{02}/M_{20})^{1/2} = (M_{2x}/M_{2y})^{1/2} \quad (91)$$

Parametr anizotropii wprowadzony przez Rudzita [65] jest zdefiniowany:

$$\gamma_R = S_{mx}/S_{my} \quad (92)$$

gdzie:

S_m - średni odstęp między dwoma dodatnimi przekroczeniami poziomu zerowego, czyli $S_m = 2/n(0)$

W pracy [52] wykorzystano jako współczynnik anizotropii powierzchni iloraz formy powierzchni:

$$\gamma_p = (\lambda_{0.5})_x / (\lambda_{0.5})_y \quad (93)$$

przy czym odległość korelacyjna $\lambda_{0.5}$ oznacza takie przesunięcie, dla którego wartość unormowanej funkcji autokorelacji $R(\lambda)/\sigma^2$ wynosi 0,5.

Metoda PS

Metoda punktów szczególnych jest praktyczną adaptacją metody FAK w przypadku, gdy nie ma technicznych możliwości wyznaczenia tej funkcji (dyskretyzacja profilu i numeryczne wyznaczenie FAK za pomocą elektronicznych maszyn cyfrowych).

Podstawą tej metody są parametry analogiczne do parametrów FAK [23] mianowicie:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= E(R_a) = \hat{R}_a \\ \pi_2 &= E[n(0)] = \hat{n}(0) \\ \pi_3 &= E(m) = \hat{m} \end{aligned} \quad (94)$$

Parametr $\pi_1 = R_a$ jest parametrem chropowatości wyznaczonym za

pomocą typowych przyrządów służących do pomiaru chropowatości profilu.

Parametr $\pi_2 = n(0)$ można wyznaczyć zgodnie z definicją:

$$n(0) = \frac{N(0)}{L} \quad (95)$$

Parametr $\pi_3 = m$ wyznacza się zgodnie z jego definicją przez zliczenie liczby wierzchołków W na profilogramie i podzielenie jej przez odcinek pomiarowy.

$$m = \frac{W}{L} \quad (96)$$

Dalszy tok postępowania jest następujący: Parametry metody punktów szczególnych umożliwiają wyznaczenie przybliżonych wartości aproksymowanych funkcji autokorelacji w postaci unormowanej, poprzez powiązanie relacjami parametrów π_1 , π_2 , π_3 z parametrami funkcji autokorelacji. Relacje te umożliwiają wyznaczenie orientacyjnych funkcji profilu FAK uwzględnianych w charakterystyce chropowatości powierzchni.

Wyznaczone w ten sposób funkcje mają jednak charakter przybliżony.

Określenie wartości parametrów profilu, uwzględnianych w charakterystyce chropowatości, metodą punktów szczególnych sprowadza się do obliczenia estymatorów tych parametrów za pomocą wielkości π_1 , π_2 , π_3 , przy czym przyjmuje się, że oznaczają one zawsze wartości oczekiwane.

Wartości oczekiwane przykładowych parametrów wysokości profilu są określone następującymi zależnościami:

- Średnia wysokość nierówności:

$$R_a = E(R_a) = \pi_1 \quad (97)$$

- średnie odchylenie kwadratowe:

$$R_q = E(R_q) = \sqrt{\pi/2} R_a \quad (98)$$

- wysokość najwyższego wierzchołka:

$$H_{\max}^{\wedge} = E(H_{\max}) \approx R_a \sqrt{\pi \ln [\ln(0)]} \left[1 + \frac{0.577}{2 \ln \frac{\ln(0)}{2}} \right] =$$

$$= R_a \sqrt{\pi \ln \frac{\ln(0)}{2}} \quad (99)$$

- największa wysokość chropowatości:

$$R_{\max}^{\wedge} = E(R_{\max}) \approx 2H_{\max} = 2R_a \sqrt{\pi \ln \frac{\ln(0)}{2}} \quad (100)$$

Opis powierzchni przy pomocy teorii procesów losowych daje pełny obraz w przypadku wielowymiarowego rozkładu normalnego oraz izotropowej struktury mikrogeometrycznej [74]. Taki opis posiada jednak istotne wady wynikające z faktu, że powierzchnie elementów maszyn nie są izotropowe. Ponadto dużą trudność sprawia wyznaczenie parametrów wyjściowych modelu, które można określić za pomocą wielu metod np.: zliczania punktów zerowych i maksimów, różniczkowania numerycznego, całkowania numerycznego szeregów autoregresyjnych. Użycie każdej z tych metod wymaga specjalistycznego oprogramowania, lub pracochłonnego, żmudnego odczytywania profilogramów powierzchni, obarczonego znacznymi błędami odczytu. Z tych też powodów model losowy powierzchni nie znalazł szerszego zastosowania w badaniach tribologicznych, a tym bardziej w praktyce inżynierskiej.

3.2. Wybór parametrów chropowatości mających decydujący wpływ na proces zużycia.

Wpływ wartości poszczególnych parametrów chropowatości na przebieg procesu i późniejszą wartość zużycia nie jest jednakowy. Prace nad ustaleniem wpływu parametrów były prowadzone w różnych ośrodkach [74], [80], [40], [47].

Mikrogeometria powierzchni wpływa na procesy zachodzące w parze trące w zależności od rodzaju tarcia. Przy tarcia płynnym nierówności powierzchni oddziałują na przepływ środka smarowego, wpływają więc na grubość warstwy smarowej. Z punktu widzenia procesów smarowania

najistotniejszymi cechami mikrogeometrii współpracujących elementów są wertykalny rozkład materiału w przekroju (profilu) równoległym do kierunku ruchu oraz ukierunkowanie horyzontalne struktury powierzchni [74]. Powierzchnia tulei cylindrowej wykazuje dużą anizotropię. W związku z powyższym wspomniane cechy nabierają szczególnego znaczenia. Charakter pracy pary trącej tuleja cylindrowa - pierścienie tłokowe jest taki, że w przeważającej części cyklu pracy występuje tarcie płynne, jednakże w położeniach zwrotnych tłoka (szczególnie GMP) występuje tarcie mieszane.

W związku z powyższym istotnymi z punktu widzenia współpracy elementów węzła TPC parametrami chropowatości są:

- odchylenie standardowe rzędnych profilu R_q ,
- współczynnik skośności rozkładu R_{sk} ,
- współczynnik skupienia rozkładu R_{ku} ,
- współczynnik kierunkowości struktury γ .

Podczas tarcia mieszanego, granicznego lub suchego cechy mikrogeometryczne powierzchni wpływają na zjawiska termosprężyste w obszarach styku wierzchołków nierówności. Ważną sprawą (również ze względu na geometrię wpływu środka smarnego) jest więc scharakteryzowanie rozkładu wierzchołków, promieni ich krzywizny oraz ich gęstości liniowej i powierzchniowej. W tym celu opracowano pewne zależności korelacyjne pomiędzy tymi wielkościami a wartością R_q , jednakże są one obarczone trudnymi do oszacowania błędami z uwagi na to, że profilometry nie podają parametrów dotyczących wierzchołków nierówności [74].

Jako zmienne wejściowe przyjęto:

$$R_q, R_{sk}, R_{ku}$$

Ostateczna postać funkcji aproksymującej przedstawia się następująco:

$$Z_t(t) = f(R_q, R_{sk}, R_{ku}) \quad (101)$$

3.3. Szczegółowy sposób oceny wartości zużycia tulei cylindrowych.

Oceny wartości zużycia tulei cylindrowych i innych elementów węzła

TPC są prowadzone przede wszystkim przy wykorzystaniu pomiarów geometrycznych elementów oraz ich warstwy wierzchniej. Ponadto są stosowane metody izotopowe, wagowe, sztucznych baz, chemiczne oraz pomiaru grubości warstwy niemagnetycznej.

Metodą pomiarów geometrycznych można określać zużycie elementów, których wymiary zmieniają się tylko na skutek zużycia [3], [17], [18], [38], [46], [63]. W przypadku pomiaru np. średnicy tulei cylindrowej może dojść do sytuacji, że wartość zużycia będzie mniejsza od zera. Zjawisko takie oznacza, że nastąpiła istotna deformacja kształtu przewyższająca swoją wartością wartość zużycia.

Zastosowanie metod izotopowych umożliwia śledzenie zużycia jednego lub dwóch elementów silnika, lub ich oddzielnych fragmentów w sposób quasi ciągły [44], [49], [68]. Jest to bardzo istotną ich zaletą, jednak ich zastosowanie jest ograniczone do pomiarów parametrycznych. Badania porównawcze polegające na równoległym pomiarze kilku wariantów wykonania np. węzła TPC są ograniczone do jednego węzła w silniku wielocylindrowym. Wyklucza to możliwość porównania wyników badań ze względu na trudności zachowania takich samych wymuszeń dla dwóch procesów badawczych, prowadzonych na tym samym silniku [46].

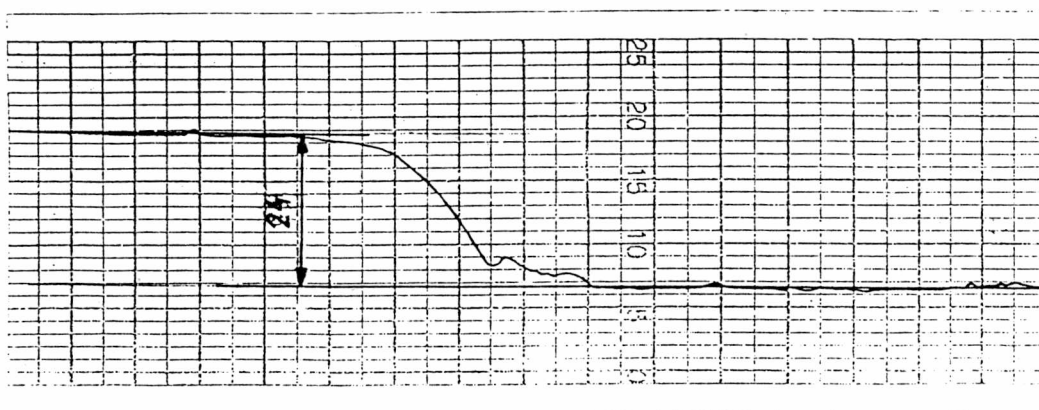
Pomiar wartości zużycia metodami chemicznymi polega na określeniu zawartości np. żelaza w oleju smarującym. Niestety, pozwala on ocenić jedynie tempo zużywania się silnika jako całości, ponieważ nie ma możliwości określenia, które z atomów żelaza pochodzą od jakich elementów [38].

Metodami wagowymi można mierzyć wartość zużycia elementów o małej wadze z uwagi na możliwe do uzyskania dokładności pomiarowe. W przypadku węzła TPC tymi metodami mierzy się zużycie jedynie pierścieni tłokowych. Mierzony jest sumaryczny ubytek ich wagi. Jest to niedogodność, gdyż można jedynie określić łączne zużycie zewnętrznej powierzchni roboczej oraz obu powierzchni bocznych.

W przypadku pomiaru wartości zużycia elementów z warstwą wierzchnią niemagnetyczną (np. chromowaną) może być stosowana metoda polegająca na pomiarze grubości tej warstwy [3], [44]. Dla tulei cylindrowej dokonywany jest pomiar powyżej GMP pierwszego pierścienia uszczelniającego oraz pomiar w GMP tego pierścienia. Różnica tych wartości daje szukaną wartość zużycia. Ograniczeniem tej metody jest możliwość jej stosowania tylko do całkowitego usunięcia warstwy chromu z elementu.

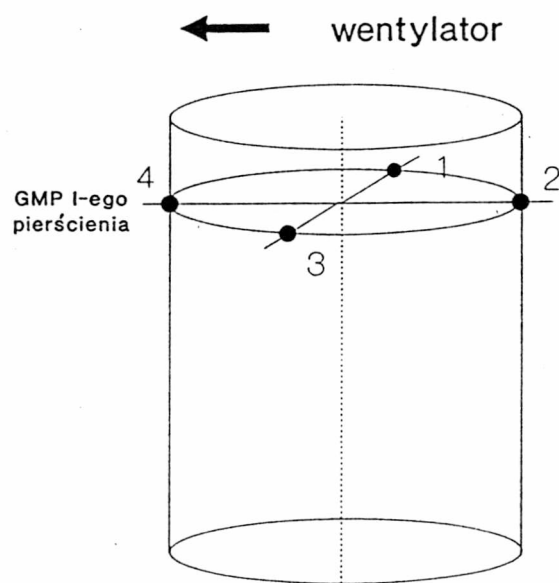
Metoda sztucznych baz polega na określeniu odległości od powierzchni tarcia do stałej bazy wybranej na początku badań. Wykonuje

się ten pomiar poprzez odczyt bezpośredni lub na podstawie pomiaru wielkości, z których można wyliczyć szukaną odległość [38], [15]. Jest ona jedną z najdokładniejszych metod pomiaru wartości zużycia stosowanych w badaniach silnikowych. Ważną cechą, jest pomiar w ściśle określonym punkcie elementu, odpowiadającym punktowi naniesienia bazy. Metoda ta jest praktycznie niewrażliwa na deformację badanych części i umożliwia pomiar "czystego" zużycia. Ze względu na bardzo małą powierzchnię naniesienia nawet dużej liczby sztucznych baz, narusza warunki tarcia i smarowania tylko w nieznacznym stopniu. Do pomiaru sztucznych baz można zastosować profilografometry. Możliwa jest pewna modyfikacja metody sztucznych baz polegająca wykorzystaniu jako bazy odniesienia fragmentu elementu praktycznie nie podlegającego zużyciu. W przypadku pomiaru wartości zużycia tulei cylindrowej w GMP pierwszego pierścienia uszczelniającego przy wykorzystaniu, jako bazę wykorzystać można tuleję powyżej GMP. Wykonując profilogram fragmentu tulei powyżej GMP, w GMP oraz poniżej GMP pierwszego pierścienia uszczelniającego, można zmierzyć wartość zużycia w każdym punkcie. Tego typu pomiar wymaga wymontowania tulei cylindrowych z bloku, co znacznie ogranicza możliwość jego zastosowania. W celu uniknięcia tej trudności opracowano metodę tzw. replik okolicy GMP pierwszego pierścienia uszczelniającego. Wykonuje się je z tworzywa chemoutwardzalnego o bardzo dużej dokładności odwzorowania powierzchni [1]. Dalsze postępowanie polega na poddaniu repliki pomiarom profilometrycznym. Na rys. 17 zamieszczono przykładowy profilogram wykonany z repliki tulei cylindrowej.



Rys. 17. Sposób odczytywania wartości zużycia tulei cylindrowej w GMP pierwszego pierścienia uszczelniającego metoda replik [3].

Z uwagi na omówione ograniczenia metod pomiarowych, ocena wartości zużycia wykonywana jest opisaną powyżej metodą replik, zgodnie ze schematem zamieszczonym na rys. 18.



Rys. 18. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych tulei cylindrowych i oznaczenia kierunków pomiarowych.

4. SFORMUŁOWANIE CELU I TEZY PRACY.

4.1. Cel pracy.

Celem pracy jest stworzenie metody sterowania trwałością wybranych elementów silników spalinowych.

4.2. Teza pracy.

Jest możliwe sterowanie trwałością elementów silnika na podstawie odpowiednio przeprowadzonych badań w eksploatacji naturalnej.

W celu udowodnienia tezy należało zrealizować następujące prace:

1. Opracowanie metody badań procesu zużycia wężła TPC w ujęciu systemowym obejmującej:
 - zdefiniowanie sposobu prowadzenia badań trwałościowych,
 - określenie czynników wpływających na obiekt badań,
 - określenie odpowiedzi obiektu,
 - przedstawienie propozycji metod prowadzenia badań trwałościowych z możliwością ograniczenia ich zakresu do niezbędnego minimum.
2. Opracowanie metody szczegółowej optymalizacji chropowatości warstwy wierzchniej tulei cylindrowych.
3. Przeprowadzenie badań trwałościowych tulei cylindrowych w eksploatacji naturalnej.
4. Identyfikacja systemowa wpływu chropowatości warstwy wierzchniej tulei cylindrowych na wartość ich zużycia materiałowego.

Metoda ta, dla maksymalizacji trwałości, jest zademonstrowana w optymalizacji chropowatości warstwy wierzchniej tulei cylindrowych silników spalinowych.

5. BADANIA PROCESU ZUŻYCIA WW TULEI CYLINDROWYCH.

Dla wyznaczenia związków pomiędzy wartością parametrów opisujących strukturę warstwy wierzchniej tulei cylindrowych, a wartością ich zużycia przeprowadzono badania eksploatacyjne. Badania te były prowadzone w ramach planowanego eksperymentu oraz badań eksploatacyjnych kontrolowanych zwanych kontrolowanym eksperymentem biernym [51] silników zamontowanych w autobusach kursowych PKS we Wrocławiu, co stwarza podstawy do założenia, że wielkości wymuszeń eksploatacyjnych (E) są podobne.

Ogółem przeprowadzono badania 17 silników typu 6CT107. Silniki skierowane do badań można scharakteryzować wektorem cech (S). W celu stwierdzenia i usunięcia ewentualnych nieprawidłowości regulacyjnych wykonano dokładne oględziny oraz pełną diagnostykę silników.

Kontrolowany eksperyment bierny prowadzono metodą próby ciągłej [25], [51] określanej przez cztery elementy uporządkowane następująco:

$$M : \langle P_{pc}, Q, \lambda_u, T_B \rangle \quad (101)$$

gdzie:

- M - metoda próby ciągłej,
- P_{pc} - parametry próby ciągłej,
- Q - obciążenia wymuszające,
- λ_u - intensywność użytkowania,
- T_B - całkowity czas badań.

Jako parametry próby ciągłej można wyróżnić następujące wielkości:

- l - liczność próby - 17 silników,
- r - ilość badanych tulei w jednym silniku; zamontowano po dwie tuleje o znanych wartościach parametrów struktury warstwy wierzchniej,
- Q - obciążenia wymuszające są to wszelkie oddziaływania wynikające z eksploatacji w warunkach naturalnych autobusów kursowych,
- λ_u - intensywność użytkowania autobusów wynosiła średnio 5.000 km miesięcznie,
- T_B - całkowity czas badań określili przebiegi autobusów do 100.000 km.

5.1. Opis elementów skierowanych do badań eksploatacyjnych współpracujących z tulejami cylindrowymi.

Elementy przeznaczone do badań eksploatacyjnych współpracujące z tulejami cylindrowymi zostały odpowiednio oznaczone, a następnie poddane pomiarom mikrometrycznym. Wykonano również badania metalograficzne i pomiary twardości badanych elementów. Wyniki pomiarów zamieszczono w sprawozdaniach IKiEM [2], [3], [11], [13], [14], [17], [18], [36].

Do badań eksploatacyjnych oprócz chromowanych tulei cylindrowych zostały skierowane następujące elementy:

- pierścienie tłokowe seryjne uszczelniające i zgarniające,
- tłoki seryjne,
- sworznie tłokowe seryjne,
- tuleje cylindrowe:
 - azotowane wg technologii IMP-u (12 sztuk),
 - azotonasiarczane wg technologii Politechniki Łódzkiej (29 sztuk),
 - chromowane wg technologii Politechniki Wrocławskiej (20 sztuk),
 - azotowane produkcji Sheabridge (4 sztuki),
 - azotowane produkcji Tarabusi (4 sztuki),

Powyższe tuleje cylindrowe oznaczone są na schemacie montażowym przedstawionym na rys. 20 jako tuleje porównawcze.

5.1.1. Pierścienie tłokowe.

Pierścienie tłokowe można opisać przy pomocy cech materiałowych (C_{Mp}), cech konstrukcyjnych (C_{Kp}) oraz cech technologicznych. W celu ujednorodnienia ich wpływu na przebieg procesu zużycia, wszystkie pierścienie skierowane do badań eksploatacyjnych poddano ścisłej selekcji wymiarowej oraz przeprowadzono selekcję ze względu na wielkości sił sprężystości oraz wagi pierścieni.

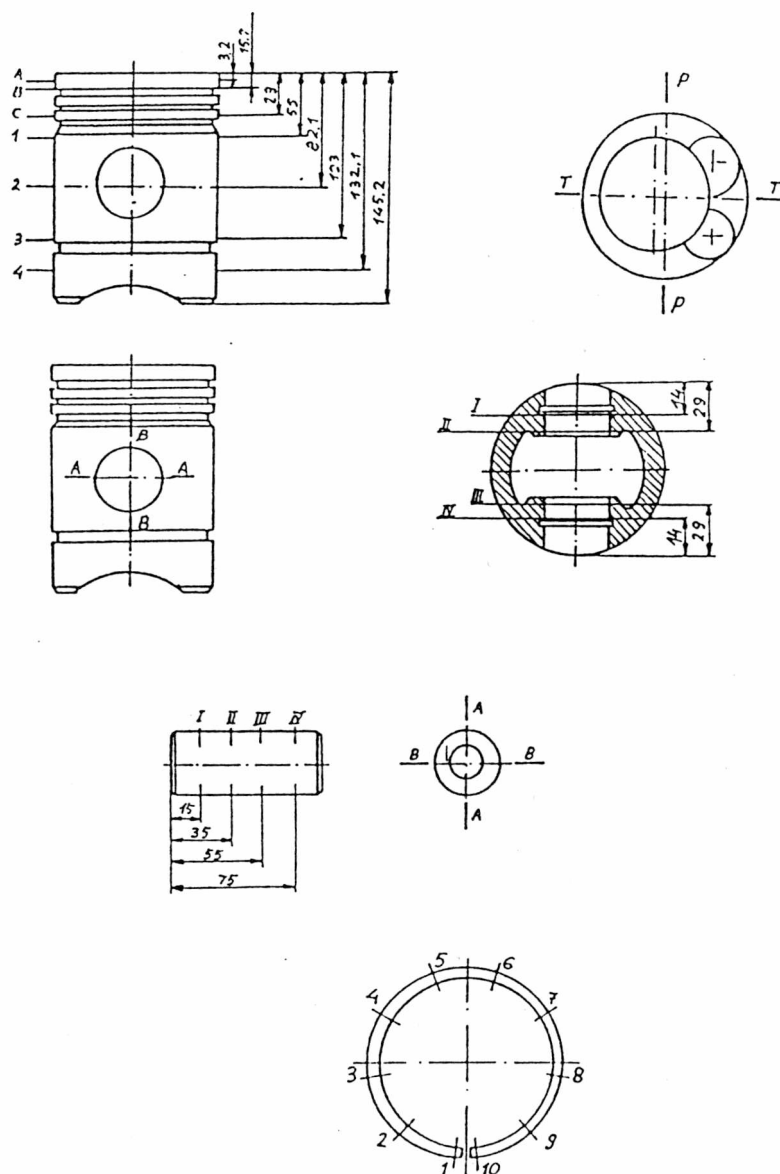
Wykonano następujące pomiary pierścieni tłokowych:

- pomiar grubości i wysokości,
- pomiar masy,
- pomiar siły sprężystości.

5.2.1.1 Pomiary geometrii kształtu i masy.

Pomiary geometrii kształtu wykonano zgodnie z normą BN-79/1374-04 przy użyciu długościomierza Abbe'go produkcji Carl-Zeiss-Jena NRD wg schematu przedstawionego na rys. 19.

Pomiar masy wykonano przy użyciu wagi analitycznej typu PRL A 13.



Rys. 19. Sposób pomiaru tłoków, sworzni tłokowych i pierścieni skierowanych do badań.

5.1.1.2. Pomiary sił sprężystości.

Siły sprężystości pierścieni tłokowych [27] zmierzono przy pomocy stanowiska do pomiaru wielkości siły stycznej produkcji IKiEM oraz stanowiska do pomiaru wielkości sił promieniowych również produkcji IKiEM Politechniki Wrocławskiej [64]. Pomiar odbywał się przez odczyt wskazań 18-stu czujników tensometrycznych, rozmieszczonych równomiernie na obwodzie, imitujących kształt tulei cylindrowej.

5.1.2. Pomiary tłoków i sworzni tłokowych.

Podobnie jak dla pierścieni tłokowych, tłoki można opisać podając ich zbiór cech materiałowych (C_{Mt1}), zbiór cech konstrukcyjnych (C_{Kt1}), oraz zbiór cech technologicznych (C_{Tt1}). Tłoki skierowane do badań eksploatacyjnych poddano dokładnym pomiarom geometrycznym oraz wagowym wg schematów zamieszczonych na rys. 19. Pozwoliły one na wykonanie selekcji wymiarowej i skierowanie do badań eksploatacyjnych tłoków o minimalnych różnicach wymiarów.

Pomiary sworzni tłokowych wykonano wg schematu przedstawionego na rys. 19.

5.2. Opis partii chromowanych tulei cylindrowych skierowanych do badań eksploatacyjnych.

Tuleje cylindrowe można opisać przy pomocy cech materiałowych (C_{Mt}), cech konstrukcyjnych (C_{Kt}) oraz cech technologicznych (C_{Tt}).

Określenie wpływu chropowatości warstwy wierzchniej tulei cylindrowej (C_{Tt}) na jej zużycie jest możliwe przy powtarzalności pozostałych cech ją opisujących ($C_{Mt} = \text{idem}$, $C_{Kt} = \text{idem}$).

Cechy materiałowe tulei cylindrowej (C_{Mt}).

Przed rozpoczęciem badań eksploatacyjnych jedną tuleję chromowaną skierowano do niszczących badań mikrotwardości i materiałowych. Celem tych badań była identyfikacja stanu faktycznego budowy krystalograficznej i stwierdzenie wartości mikrotwardości badanych tulei cylindrowych [17].

Badania składu chemicznego żeliwa rdzenia tulei wykazały

następującą zawartość pierwiastków:

3.37 % C; 2.25 % Si; 0.62 % Mn; 0.423 % P; 0.054 % S.

Obecności dodatków stopowych nie stwierdzono. Skład chemiczny żeliwa jest zgodny z normą obowiązującą dla żeliwa szarego.

Twardość żeliwa, z którego wykonano tuleję wynosi od 215 do 225 HV. Ze względu na małą grubość warstwy chromu jej twardość określano przy obciążeniu 50 G za pomocą mikrotwardościomierza. Średnia twardość powłoki chromowej wynosi około $1031 \pm 24 \text{ HV } 0.050$.

W celu identyfikacji struktury materiału tulei cylindrowej wybrane tuleje cylindrowe poddano badaniom makroskopowym i mikroskopowym;

Badania makroskopowe wykazały, że powierzchnia wewnętrzna tulei jest jasna, lekko matowa ze słabo widoczną siatką śladów szlifowania przecinających się pod kątem 30° . Ślady te o nieostrych krawędziach wskazują iż szlifowanie zostało przeprowadzone przed chromowaniem. Po stronie zewnętrznej tulei widoczne są rysy po szlifowaniu [17].

Badania mikroskopowe przeprowadzono na szlifach wykonanych z próbek pobranych z górnej, środkowej i dolnej części tulei. Przed trawieniem stwierdzono grafit płatkowy prosty o długości zmieniającej się wzdłuż ścianki tulei. Rozmieszczenie grafitu ma charakter rozetkowy [17]. Na powierzchni wewnętrznej tulei widoczna jest jednolita warstwa chromu o grubości 0.045 mm. Po wytrawieniu 3% nitałem stwierdzono perlityczną strukturę osnowy bez ferrytu, z perlitem o dyspersji do 0.3 mm [17]. W osnowie występują wtrącenia potrójnej drobnoziarnistej eutektyki fosforowej tworzącej dobrze ukształtowaną siatkę o średnicy oczek od 250 do 500 μm . Największe wtrącenia eutektyki fosforowej wykazują średnią powierzchnię poniżej 2000 μm^2 . Warstwa chromu dobrze przylega do żeliwnego podłoża wypełniając wszystkie nierówności. Powierzchnia chromu wykazuje także swoistą strukturę o kulistych, jasnych ziarnach będących przekrojami dendrytów chromu, które wyrastały od powierzchni żeliwa w kąpeli galwanicznej.

Cechy konstrukcyjne tulei cylindrowej (C_{kt}).

W celu sprawdzenia cech konstrukcyjnych tulei cylindrowej, czyli jej makrogeometrii wykonano pomiary grubości ścianki tulei. Przeprowadzone wrywkowo pomiary wykazały dużą powtarzalność wyników.

Rozrzut wyników wahał się w granicach 0.05 % [3], [17], [18]. Upoważnia to do stwierdzenia, że cechy konstrukcyjne tulei cylindrowych $C_{kt} = \text{idem}$.

Wyżej przytoczone rozważania pozwalają na ograniczenie ilości zmiennych wejściowych eksperymentu do cech technologicznych tulei cylindrowej (C_{Tt}).

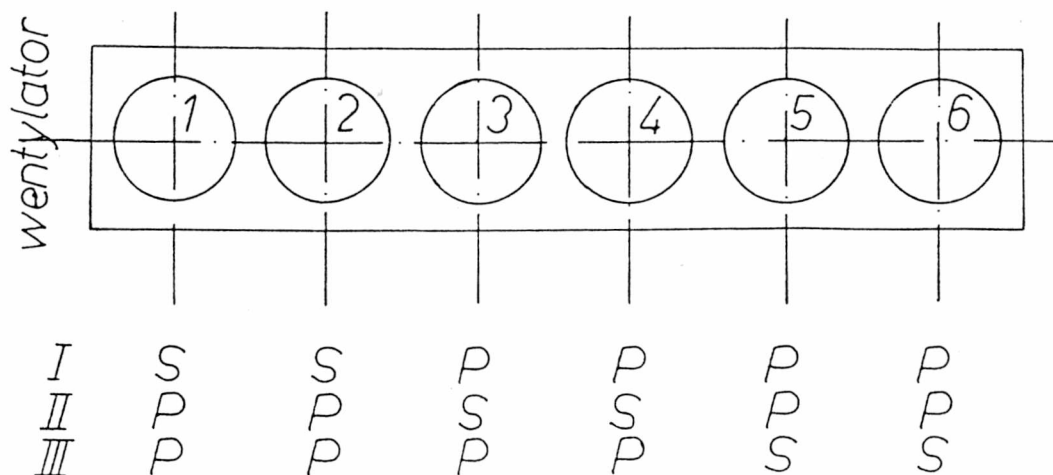
5.3.1. Badania profilometryczne.

Pomiarom profilometrycznym poddano 33 sztuki tulei cylindrowych. Tuleje zostały zmierzone w czterech punktach pomiarowych zgodnie ze schematem zamieszczonym na rys. 18. W tym celu zostały one oznakowane i naniesiono na nich numery identyfikacyjne.

Badania zostały przeprowadzone w WSM Krotoszyn. Wyniki pomiarów profilometrycznych zamieszczono w sprawozdaniach IKiEM [11], [13], [14].

5.3.2. Montaż i pomiary tulei cylindrowych w silnikach typu 6CT107.

Przed montażem tulei wykonano pomiary średnicy gniazd tulei cylindrowych w bloku silnika w celu sprawdzenia ich kołowości i prawidłowości wymiarowej. Montaż został przeprowadzony zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 20.



Rys. 20. Schemat montażu tulei cylindrowych w bloku silnika.

S - tuleja seryjna,

P - tuleja porównawcza.

6. WYNIKI BADAŃ PROCESU ZUŻYCIA WW TULEI CYLINDROWYCH W EKSPLOATACJI NATURALNEJ.

Pomiary wartości zużycia tulei zostały wykonane metodą replik po 50 oraz 100 tys. km przebiegu silnika.

6.1. Wartości zużycia tulei cylindrowych w badaniach eksploatacyjnych.

Wartość zużycia stanowiąca podstawę dopuszczenia do dalszej eksploatacji tulei cylindrowej liczona jest, wg Polskiej Normy, jako średnia z pomiarów zużycia wykonywanych na obwodzie tulei cylindrowej w GMP pierwszego pierścienia uszczelniającego. Punkty pomiarowe są rozmieszczone zgodnie ze schematem na rys. 18. Oznacza to, że zakłada się równomierne zużycie tulei na obwodzie. W przypadku, gdy występuje nierównomierne zużycie, popełnione mogą być błędy polegające na dopuszczeniu do dalszej eksploatacji tulei, które dopuszczone być nie powinny ze względu na np. wzrost przedmuchu spalin, czy spadek mocy.

Istotna jest zatem nie średnia wartość zużycia, lecz zużycie miejscowe (kierunkowe). W związku z powyższym należy określić:

- czy istnieją gniazda, w których zużycie jest większe od pozostałych w sposób istotny?.
- czy istnieją kierunki, w których zużycie jest większe od pozostałych w sposób istotny?,

W celu uzyskania odpowiedzi na postawione pytania policzono średnie wartości zużycia wszystkich tulei cylindrowych skierowanych do badań eksploatacyjnych po przebiegu 50 oraz 100 tys. km.

W celu zbadania istotności dwóch wartości średnich zużycia tulei cylindrowych analizuje się dwie populacje generalne posiadające założenia rozkłady normalne [70] $N(m_1, \sigma_1)$ oraz $N(m_2, \sigma_2)$. Stawia się hipotezę $H_0: m_1 = m_2$ wobec hipotezy alternatywnej $H_1: m_1 \neq m_2$, gdzie m_1 i m_2 są odpowiednimi średnimi wartościami zużycia tulei cylindrowych w gniazdach silnika lub kierunkach pomiarowych tulei.

Test istotności dla tak sformułowanej hipotezy jest następujący:

$$t_s = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (102)$$

Statystyka (110) ma rozkład t - Studenta o $n_1 + n_2 - 2$ stopniach swobody przy założeniu prawdziwości hipotezy H_0 . Zakładając poziom istotności $\alpha = 0.05$ przy $n_1 + n_2 - 2$ stopniach swobody odczytuję z tablic rozkładu t - Studenta wartość t_{kr} dla którego spełniona jest równość:

$$P\{|t_s| \geq t_{kr}\} = \alpha \quad (103)$$

Jeżeli $|t_s| \geq t_{kr}$ to hipotezę H_0 należy odrzucić, w przeciwnym przypadku nie ma podstaw do jej odrzucenia, więc $m_1 = m_2$.

Wartości statystyk t - Studenta można obliczyć przy pomocy pakietu zintegrowanego STATGRAPHIX, który umożliwia również przeprowadzenie testów istotności dla wartości średnich.

6.1.1. Wartości zużycia tulei cylindrowych w gniazdach.

W tabelach 1 oraz 2 zamieszczono wartości średnie, wariancje oraz odchylenia standardowe zużyć tulei cylindrowych w poszczególnych gniazdach i we wszystkich kierunkach pomiarowych po przebiegu 50 tys. km (tab. 1) i 100 tys. km (tab 2). Analiza uzyskanych wyników przy pomocy testu (110) pozwoli na otrzymanie odpowiedzi na pierwsze z pytań, to znaczy czy istnieją w silniku gniazda, których średnia wartość zużycia jest większa od pozostałych w sposób istotny.

Tabela 1.

Wartości średnie, wariancje i odchylenia standardowe zużycia tulei cylindrowych w GMP pierwszego pierścienia po przebiegu 50 tys. km w poszczególnych gniazdach silnika.

Nr gniazda	1	2	3	4	5	6
wartość średnia $z_{50}, \mu\text{m}$	14.588	15.162	17.250	13.721	17.956	13.575
wariancja σ_{50}^2	92.246	202.94	288.46	81.955	174.91	100.99
odchylenie standardowe σ_{50}	9.604	14.246	16.984	9.055	13.225	10.049
liczność próby n_{50}	68	68	68	68	68	68

Wartości statystyk t obliczonych dla kombinacji porównania średnich wartości zużycia tulei cylindrowych w poszczególnych gniazdach po przebiegu 50 tys. km zestawiono poniżej:

$$\begin{aligned}
 t_{1.2} &= -0.275; & t_{2.3} &= -0.777; & t_{3.4} &= -1.512; & t_{4.5} &= -2.178; \\
 t_{1.3} &= -1.125; & t_{2.4} &= 0.704; & t_{3.5} &= -0.270; & t_{4.6} &= -0.089; \\
 t_{1.4} &= 0.542; & t_{2.5} &= -1.185; & t_{3.6} &= 1.536; & t_{5.6} &= 2.175; \\
 t_{1.5} &= -1.669; & t_{2.6} &= 0.751; & & & & \\
 t_{1.6} &= 0.602; & & & & & &
 \end{aligned}$$

gdzie:

t_{ij} - statystyka dla porównania średnich wartości zużycia tulei cylindrowych w gnieździe "i" z zużyciem w gnieździe "j".

Wartość krytyczna t -Studenta przy 134 stopniach swobody oraz poziomie istotności $\alpha = 0.05$ wynosi $t_{kr(0.05;134)} = 1.960$. Porównując wartości statystyk t_{ij} po przebiegu 50 tys. km z wartością t_{kr} można zauważyć, że jedynie w przypadku $t_{4.5}$, $t_{5.6}$ hipoteza o równości wartości średnich jest nieprawdziwa ($|t_{4.5}|, |t_{5.6}| > t_{kr}$).

Stwierdzono, że średnie wartości zużycia tulei cylindrowych po przebiegu 50 tys. km w gniazdach 4 i 6 są istotnie mniejsze niż w pozostałych.

Tabela 2.

Wartości średnie, wariancje i odchylenia standardowe wartości zużycia tulei cylindrowych w GMP pierwszego pierścienia po przebiegu 100 tys. km w poszczególnych gniazdach silnika.

Nr gniazda	1	2	3	4	5	6
wartość średnia $\bar{z}_{100}, \mu\text{m}$	26.103	25.250	29.029	25.500	29.427	22.662
wariancja σ_{100}^2	258.57	286.76	559.16	400.49	349.32	173.30
odchylenie standardowe σ_{100}	16.080	16.934	23.647	20.012	18.690	13.164
liczność próby n_{100}	68	68	68	68	68	68

Wartości statystyk t obliczonych dla kombinacji porównania średnich wartości zużycia tulei cylindrowych w poszczególnych gniazdach po przebiegu 100 tys. km zestawiono poniżej:

$$\begin{aligned}
 t_{1.2} &= 0.301 ; & t_{2.3} &= -1.072 ; & t_{3.4} &= 0.939 ; & t_{4.5} &= -1.182 ; \\
 t_{1.3} &= -0.844 ; & t_{2.4} &= -0.079 ; & t_{3.5} &= -0.108 ; & t_{4.6} &= 0.977 ; \\
 t_{1.4} &= 0.193 ; & t_{2.5} &= -1.365 ; & t_{3.6} &= 1.940 ; & t_{5.6} &= 2.440 ; \\
 t_{1.5} &= -1.111 ; & t_{2.6} &= 0.995 ; & & & & \\
 t_{1.6} &= 1.365 ; & & & & & &
 \end{aligned}$$

gdzie:

t_{ij} - statystyka dla porównania średniej wartości zużycia tulei cylindrowych w gnieździe "i" z zużyciem w gnieździe "j".

Wartość krytyczna przy 134 stopniach swobody oraz poziomie istotności $\alpha = 0.05$ wynosi $t_{kr(0.05;134)} = 1.960$. Porównanie wartości statystyk t - Studenta po przebiegu 100 tys. km z wartością t_{kr} wskazują uprzywilejowanie gniazda nr 6 ($|t_{5.6}| > t_{kr}$).

Stwierdzono, że w gnieździe 6 średnia wartość zużycia tulei cylindrowych po przebiegu 100 tys. km jest istotnie mniejsza, niż w pozostałych.

6.1.2. Wartości zużycia tulei cylindrowych w kierunkach pomiarowych.

W celu otrzymania odpowiedzi na drugie z postawionych pytań, wykonałem obliczenia średnich wartości zużyć w poszczególnych kierunkach pomiarowych, abstrahując od numeru gniazda oraz od rodzaju tulei cylindrowej.

Wartości odpowiednich parametrów statystycznych zamieściłem w tabeli 3 (50 tys. km przebiegu) oraz tabeli 4 (100 tys. km przebiegu).

Tabela 3

Wartości średnie, wariancje oraz odchylenia standardowe zużycia tulei cylindrowych w GMP pierwszego pierścienia po przebiegu 50 tys. km w poszczególnych kierunkach pomiarowych.

Nr kierunku	1	2	3	4
wartość średnia z_{50} , μm	14.892	15.058	17.363	13.578
wariancja σ_{50}^2	132.89	193.64	175.14	133.236
odchylenie σ_{50} standardowe	11.521	13.916	13.234	11.543
liczebność próby n	102	102	102	102

Wartości statystyk t obliczonych dla kombinacji porównania średnich wartości zużycia tulei cylindrowych w poszczególnych kierunkach po przebiegu 50 tys. km zestawiono poniżej:

$$\begin{aligned}
 t_{1.2} &= -0.092 ; & t_{2.3} &= -1.230 ; & t_{3.4} &= 2.176 ; \\
 t_{1.3} &= -1.442 ; & t_{2.4} &= 0.352 ; & & \\
 t_{1.4} &= 0.787 ; & & & &
 \end{aligned}$$

gdzie:

$t_{k,m}$ - statystyka dla porównania zużycia w kierunku pomiarowym "k" z zużyciem w kierunku pomiarowym "m".

Wartość krytyczna przy 202 stopniach swobody oraz poziomie istotności $\alpha = 0.05$ wynosi $t_{kr(0.05;200)} = 1.960$. Wartość bezwzględna statystyki $t_{3.4}$ jest większa od t_{kr} ($|t_{3.4}| > t_{kr}$), co świadczy o istotnej różnicy pomiędzy zużyciem w kierunku pomiarowym nr 3 oraz 4.

Tabela 4

Wartości średnie, wariancje oraz odchylenia standardowe zużycia tulei cylindrowych w GMP pierwszego pierścienia po przebiegu 100 tys. km w poszczególnych kierunkach pomiarowych.

Nr kierunku	1	2	3	4
wartość średnia $\bar{z}_{100}, \mu\text{m}$	24.882	25.173	30.392	24.216
wariancja σ_{100}^2	272.84	335.63	386.26	364.01
odchylenie standardowe σ_{100}	16.506	18.320	19.654	19.079
liczebność próby n	102	102	102	102

Wartości statystyk t obliczonych dla kombinacji porównania średnich wartości zużycia tulei cylindrowych w poszczególnych kierunkach po przebiegu 100 tys. km zestawiono poniżej:

$$\begin{aligned}
 t_{1.2} &= -0.104 ; & t_{2.3} &= -1.975 ; & t_{3.4} &= 2.277 ; \\
 t_{1.3} &= -2.168 ; & t_{2.4} &= 0.352 ; & & \\
 t_{1.4} &= 0.266 ; & & & &
 \end{aligned}$$

gdzie:

$t_{k,m}$ - statystyka dla porównania zużycia w kierunku pomiarowym "k" z zużyciem w kierunku pomiarowym "m".

Wartość krytyczna przy 202 stopniach swobody i poziomie istotności $\alpha = 0.05$ wynosi $t_{kr(0.05;200)} = 1.960$. Wartości bezwzględne statystyk $|t_{1.3}|$, $|t_{2.3}|$ oraz $|t_{3.4}|$ przekraczają wartość krytyczną, co stwarza podstawy do odrzucenia hipotezy H_0 o równości wartości średnich.

Przeprowadzone analizy upoważniają do stwierdzenia, że zużycie tulei cylindrowych w kierunku pomiarowym nr 3 po przebiegu 100 tys. km dla silnika 6CT107 jest istotnie większe, niż w pozostałych kierunkach pomiarowych. Ponadto stwierdzono, że umiejscowienie tulei cylindrowej w różnych gniazdach nie ma istotnego wpływu na maksymalną wartość jej zużycia.

6.2. Wyniki badań eksploatacyjnych tulei chromowanych.

Wyniki pomiarów wartości zużycia tulei cylindrowych zmierzone metodą replik w czterech kierunkach pomiarowych po przebiegu 50 i 100 tys. km zamieszczono w tabelach 5 oraz 6.

Dokonano pomiaru zużycia 33 tulei cylindrowych, każdej w czterech kierunkach pomiarowych, co daje 132 wyniki pomiarów.

Tabela 5.

Średnie wartości zużycia chromowanych tulei cylindrowych po przebiegu 50 tys. km.

Nr kierunku pomiarowego	Wartość zużycia po 50 tys. km μm
1	14.364
2	14.406
3	16.467
4	15.097

Tabela 6.

Średnie wartości zużycia chromowanych tulei cylindrowych po przebiegu 100 tys. km.

Nr kierunku pomiarowego	Wartość zużycia po 100 tys. km μm
1	23.073
2	25.306
3	26.870
4	23.079

6.2.1. Badanie istotności różnic średnich wartości zużycia chromowanych tulei cylindrowych w poszczególnych kierunkach pomiarowych.

Sprawdzenie istotności różnic średnich wartości zużycia tulei cylindrowych w kierunkach pomiarowych przeprowadzono przy pomocy testu t-Studenta używając w tym celu pakiet zintegrowany STATGRAPHIX.

Tabela 7.

Wartości średnie, wariancje oraz odchylenia standardowe zużycia chromowanych tulei cylindrowych w GMP pierwszego pierścienia po przebiegu 50 tys. km w poszczególnych kierunkach pomiarowych.

Nr kierunku	1	2	3	4
wartość średnia z_{50} , μm	14.364	14.406	16.467	15.097
wariancja σ_{50}^2	63.301	150.38	94.462	68.990
odchylenie standardowe σ_{50}	7.9560	12.263	9.7194	8.3060
liczebność próby n	33	33	33	33

Wartości statystyk t obliczonych dla kombinacji porównania średnich wartości zużycia chromowanych tulei cylindrowych w poszczególnych kierunkach po przebiegu 50 tys. km zestawiono poniżej:

$$\begin{aligned}
 t_{1.2} &= -0.017 ; & t_{2.3} &= -0.756 ; & t_{3.4} &= 0.615 ; \\
 t_{1.3} &= -0.962 ; & t_{2.4} &= -0.268 ; \\
 t_{1.4} &= -0.366 ;
 \end{aligned}$$

gdzie:

$t_{k,m}$ - statystyka dla porównania zużycia w kierunku pomiarowym "k" z zużyciem w kierunku pomiarowym "m".

Wartość krytyczna t_{kr} przy 64 stopniach swobody oraz poziomie istotności $\alpha = 0.3$ wynosi $t_{kr(0.3;64)} = 1.046$. Wartości statystyk po przebiegu 50 tys. km nie przekraczają wartości krytycznych dla założonego poziomu istotności.

Tabela 8.

Wartości średnie, wariancje oraz odchylenia standardowe zużycia chromowanych tulei cylindrowych w GMP pierwszego pierścienia po przebiegu 100 tys. km w poszczególnych kierunkach pomiarowych.

Nr kierunku	1	2	3	4
wartość średnia $z_{100}, \mu\text{m}$	23.073	25.306	26.870	23.079
wariancja σ_{100}^2	110.19	301.16	176.95	110.38
odchylenie standardowe σ_{100}	10.467	17.354	13.302	10.506
liczebność próby n	33	33	33	33

Wartości statystyk t obliczonych dla kombinacji porównania średnich wartości zużycia chromowanych tulei cylindrowych w poszczególnych kierunkach po przebiegu 100 tys. km zestawiono poniżej:

$$\begin{aligned}
 t_{1.2} &= -0.633 ; & t_{2.3} &= -0.411 ; & t_{3.4} &= 1.285 ; \\
 t_{1.3} &= -1.287 ; & t_{2.4} &= 0.631 ; & & \\
 t_{1.4} &= 0.002 ; & & & &
 \end{aligned}$$

gdzie:

$t_{i,j}$ - statystyka dla porównania zużycia w kierunku pomiarowym "i" z zużyciem w kierunku pomiarowym "j".

Dla założonego poziomu istotności $\alpha = 0.3$ oraz 64 stopni swobody wartości bezwzględne statystyk $|t_{1.3}|$, $|t_{3.4}|$ przekraczają wartość t_{kr} .

Średnie wartości zużycia chromowanych tulei cylindrowych po przebiegu 100 tys. km w trzecim kierunku pomiarowym są istotnie większe od zużycia w pozostałych kierunkach.

6.2.2. Analiza statystyczna wartości zużycia tulei chromowanych.

W celu rozpoznania rozkładu częstości wartości zużycia oraz określenia wartości wielkości statystycznych opisujących wartości zużycia poddano je analizie statystycznej przy użyciu pakietu zintegrowanego STATGRAPHIX.

W pierwszej kolejności wyznaczono histogramy wartości zużycia. Zostały one wykonane dla wartości zużycia po przebiegu 50 i 100 tys km w czterech kierunkach pomiarowych w GMP pierwszego pierścienia na obwodzie tulei cylindrowej, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 18. Histogramy wartości zużycia zamieszczono na rysunkach 21 - 28.

Równolegle z wykonaniem histogramów wartości zużycia wykonano dopasowanie rozkładów statystycznych do wyników pomiarów wartości zużycia. Pakiet zintegrowany STATGRAPHIX umożliwia dopasowywanie 18 typów rozkładów do danych (wartości zużycia).

Najlepsze dopasowanie osiągnięto, stosując rozkład Weibulla z dwoma parametrami α_k oraz β .

Funkcja gęstości rozkładu Weibulla ma postać [39]:

$$f(x) = \frac{\alpha_k}{\beta} x^{\alpha_k - 1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha_k}\right] \quad \text{gdzie } x \geq 0 \quad (103)$$

gdzie:

$\alpha_k > 0$ - parametr rozkładu określający kształt krzywej,

β - parametr określający skalę.

Rozkłady Weibulla dopasowane do poszczególnych wartości zużycia w czterech kierunkach pomiarowych po przebiegu 50 i 100 tys. km zostały przedstawione również na rys. 21 - 28 na tle histogramów.

Przy każdym z rysunków zamieszczono wartości parametrów rozkładów.

Dopasowanie rozkładów do wartości zużycia dla każdego zbioru danych zawierającego wartości zużycia sprawdzono przy pomocy testu χ^2 . Wartości statystyki χ^2 oraz poziomy istotności zamieszczono na rysunkach 21 - 28.

Po przeprowadzeniu dopasowania rozkładów do wartości zużycia wykonano operacje liczenia statystyk dla wektorów zawierających wartości zużycia w punktach pomiarowych jak wyżej po przebiegu 50 i 100 tys. km. Wartości tych statystyk zamieszczono w tabelach na rysunkach 29 - 32.

Test χ^2

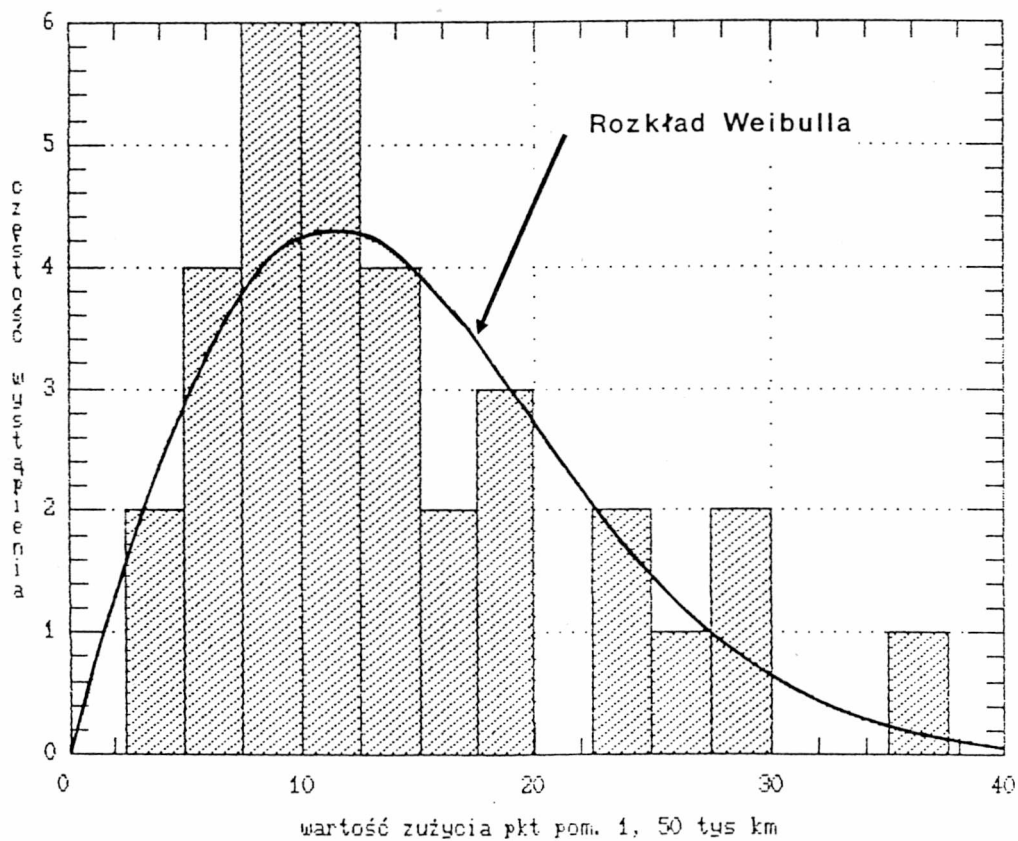
	dolna granica	górną granica	częstość obserwowana	częstość oczekiwana	χ^2
w lub ponad		7.50	6	6	0.026933
	7.50	11.50	10	10	1.733371
	11.50	14.50	5	5	0.000374
	14.50	18.50	5	6	0.104275
ponad	18.50		7	9	0.505305

$\chi^2 = 2.37032$ z 2 stopniami swobody; poziom istotności = 0.305698

$$\alpha_k = 1.97207$$

$$\beta = 16.3057$$

Histogram



Rys. 21. Rozkład częstości występowania wartości zużycia po przebiegu 50 tys. km, dopasowany rozkład Weibulla dla kierunku pom. nr 1 oraz test χ^2 .

Test χ^2

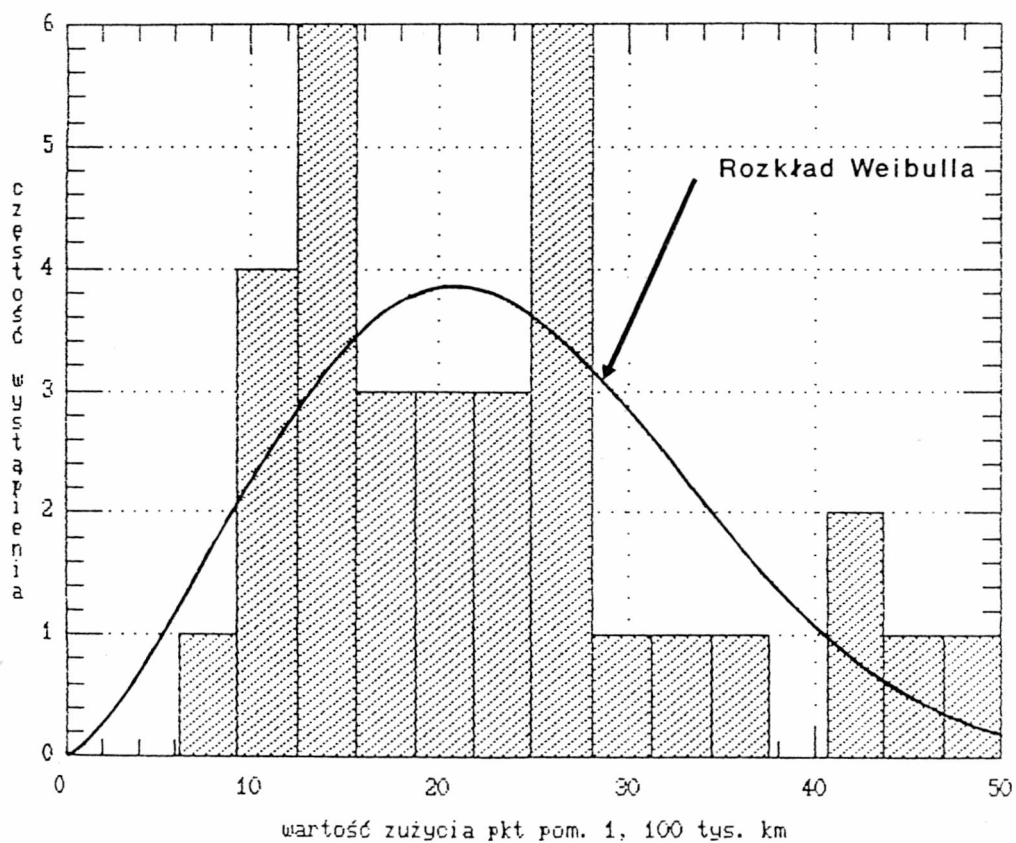
	dolna granica	górną granica	częstość obserwowana	częstość oczekiwana	χ^2
w lub ponad	12.50	18.75	5	5	0.00674
12.50	18.75	25.00	9	7	0.70610
18.75	25.00	31.25	6	8	0.33210
25.00	31.25		7	6	0.07439
ponad 31.25			6	7	0.17143

$\chi^2 = 1.29077$ z 2 stopniami swobody; poziom istotności = 0.524461

$$\alpha_k = 2.39576$$

$$\beta = 26.1252$$

Histogram



Rys. 22. Rozkład częstości występowania wartości zużycia po przebiegu 100 tys. km, dopasowany rozkład Weibulla dla kierunku pom. nr 1 oraz test χ^2 .

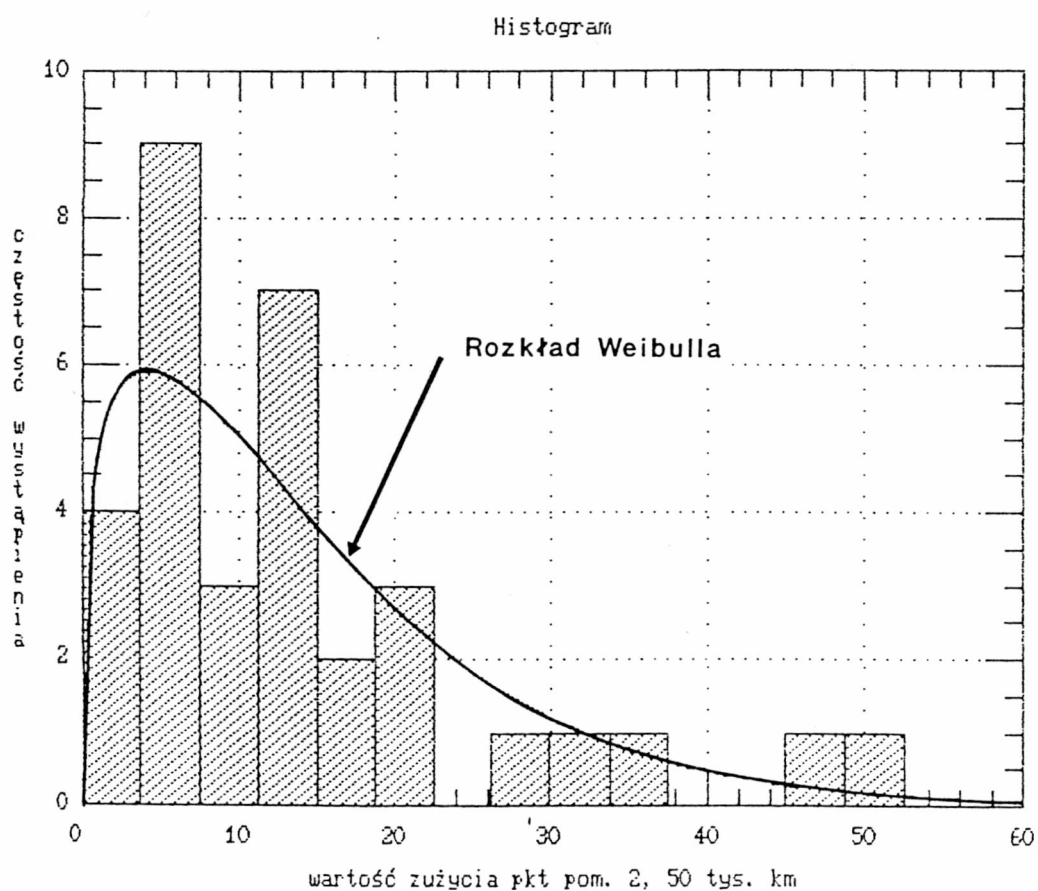
Test χ^2

	dolna granica	górna granica	częstość obserwowana	częstość oczekiwana	χ^2
w lub ponad		3.75	4	5	0.245
	3.75	7.50	9	6	1.765
	7.50	11.25	3	5	0.903
	11.25	18.75	9	8	0.248
ponad	18.75		8	9	0.181

$\chi^2 = 3.34162$ z 2 stopniami swobody; poziom istotności = 0.188094

$$\alpha_k = 1.25316$$

$$\beta = 15.5251$$



Rys. 23. Rozkład częstości występowania wartości zużycia po przebiegu 50 tys. km, dopasowany rozkład Weibulla dla kierunku pom. nr 2 oraz parametry testu χ^2 .

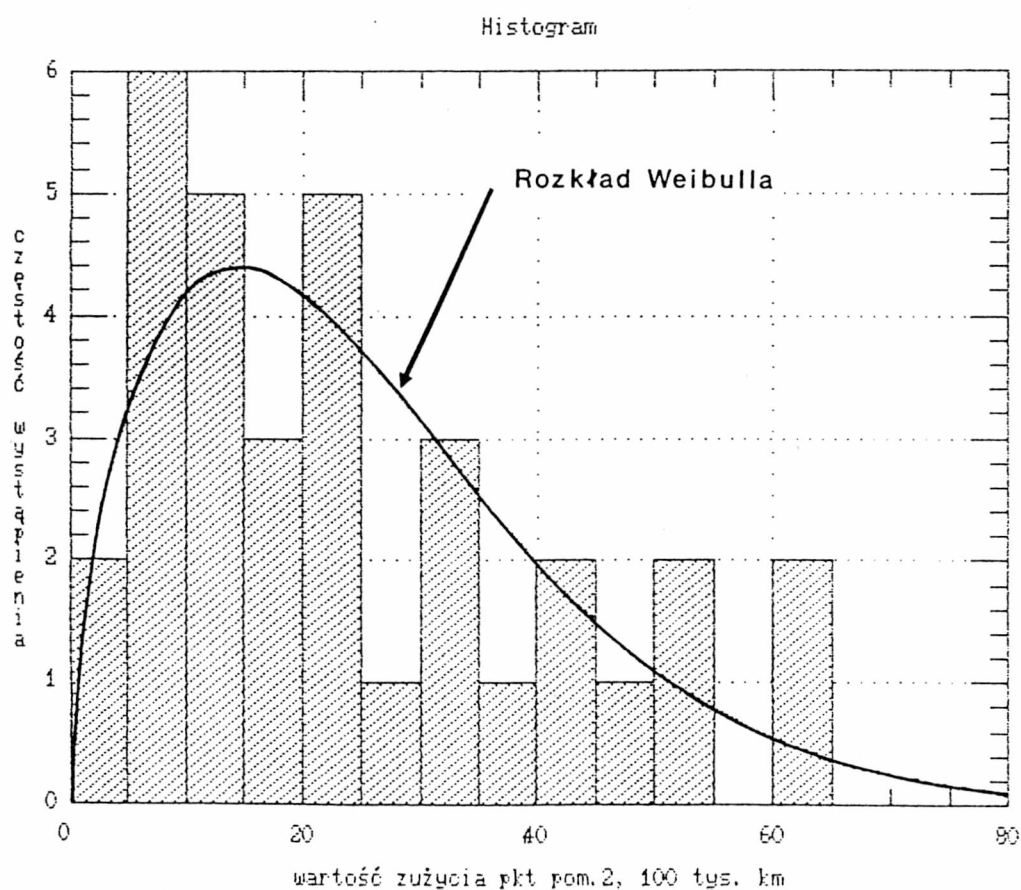
Test χ^2

	dolna granica	górná granica	częstość obserwowana	częstość oczekiwana	χ^2
w lub ponad		10.00	8	6	0.7284
10.00		20.00	8	9	0.0475
20.00		30.00	6	7	0.2624
30.00		40.00	4	5	0.2353
ponad		40.00	7	6	0.1857

$\chi^2 = 1.45928$ z 2 stopniami swobody; poziom istotności = 0.482082

$$\alpha_k = 1.55726$$

$$\beta = 28.3077$$



Rys. 24. Rozkład częstości występowania wartości zużycia po przebiegu 100 tys. km, dopasowany rozkład Weibulla dla kierunku pom. nr 2 oraz parametry testu χ^2 .

Test χ^2

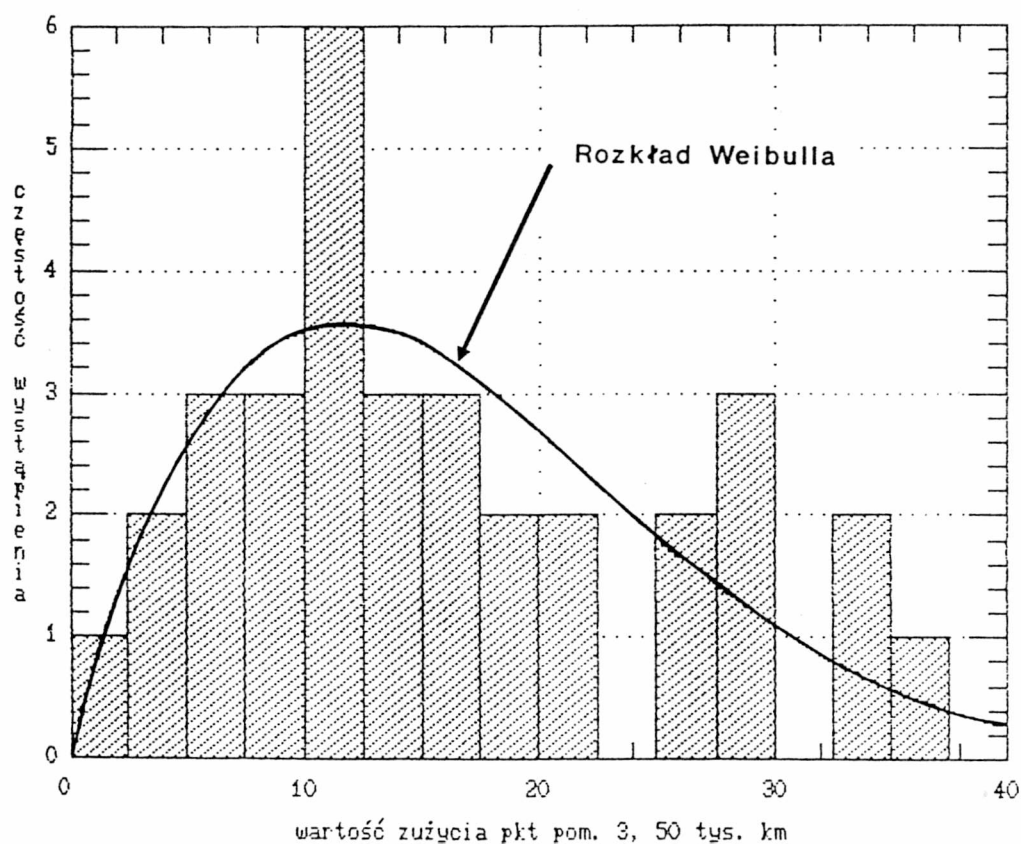
	dolna granica	górna granica	częstość obserwowana	częstość oczekiwana	χ^2
w lub ponad		7.50	6	6	0.001859
	7.50	12.50	9	7	0.616075
	12.50	17.50	6	7	0.085422
	17.50	22.50	4	5	0.355493
ponad	22.50		8	8	0.000099

$\chi^2 = 1.05895$ z 2 stopniami swobody; poziom istotności = 0.588915

$$\alpha_k = 1.79469$$

$$\beta = 18.5336$$

Histogram



Rys. 25. Rozkład częstości występowania wartości zużycia po przebiegu 50 tys. km, dopasowany rozkład Weibulla dla kierunku pom. nr 3 oraz parametry testu χ^2 .

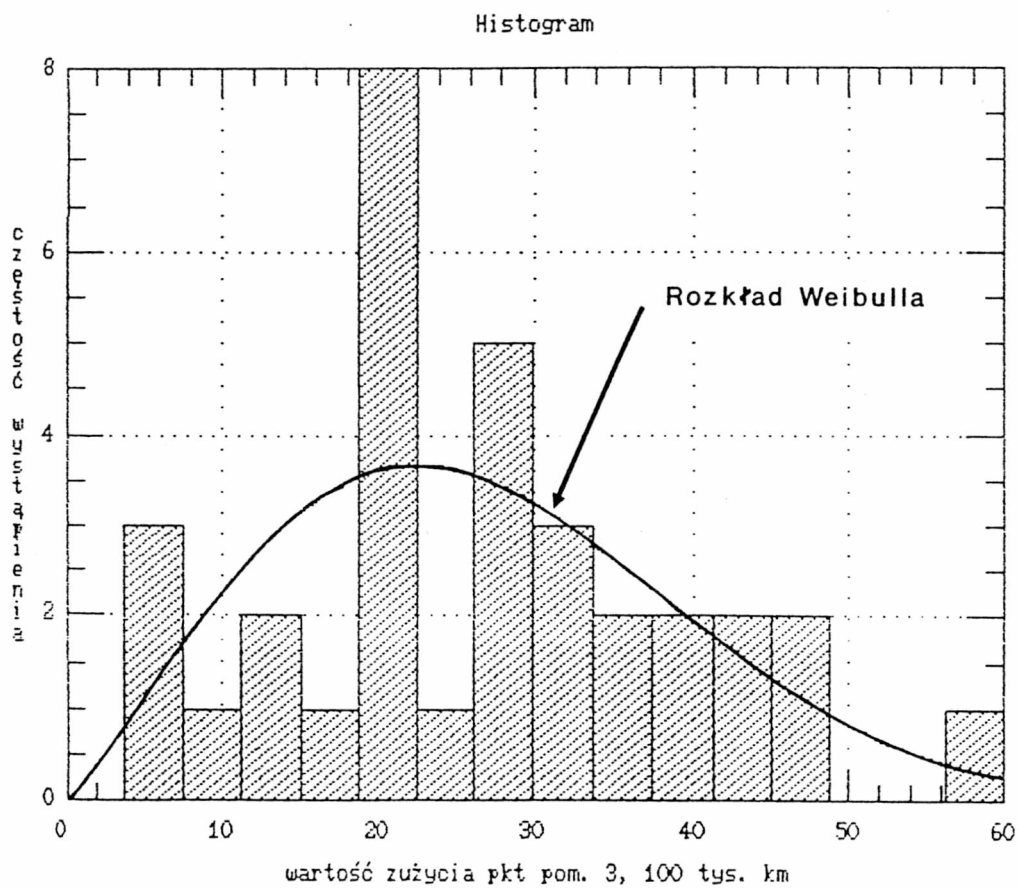
Test χ^2

	dolna granica	górna granica	częstość obserwowana	częstość oczekiwana	χ^2
w lub ponad		15.00	6	7	0.04918
	15.00	22.50	9	7	0.57513
	22.50	30.00	6	7	0.15930
	30.00	37.50	5	6	0.06320
ponad	37.50		7	7	0.00700

$\chi^2 = 0.85380$ z 2 stopniami swobody; poziom istotności = 0.652529

$$\alpha_k = 2.14359$$

$$\beta = 30.2742$$



Rys. 26. Rozkład częstości występowania wartości zużycia po przebiegu 100 tys. km, dopasowany rozkład Weibulla dla kierunku pom. nr 3 oraz parametry testu χ^2 .

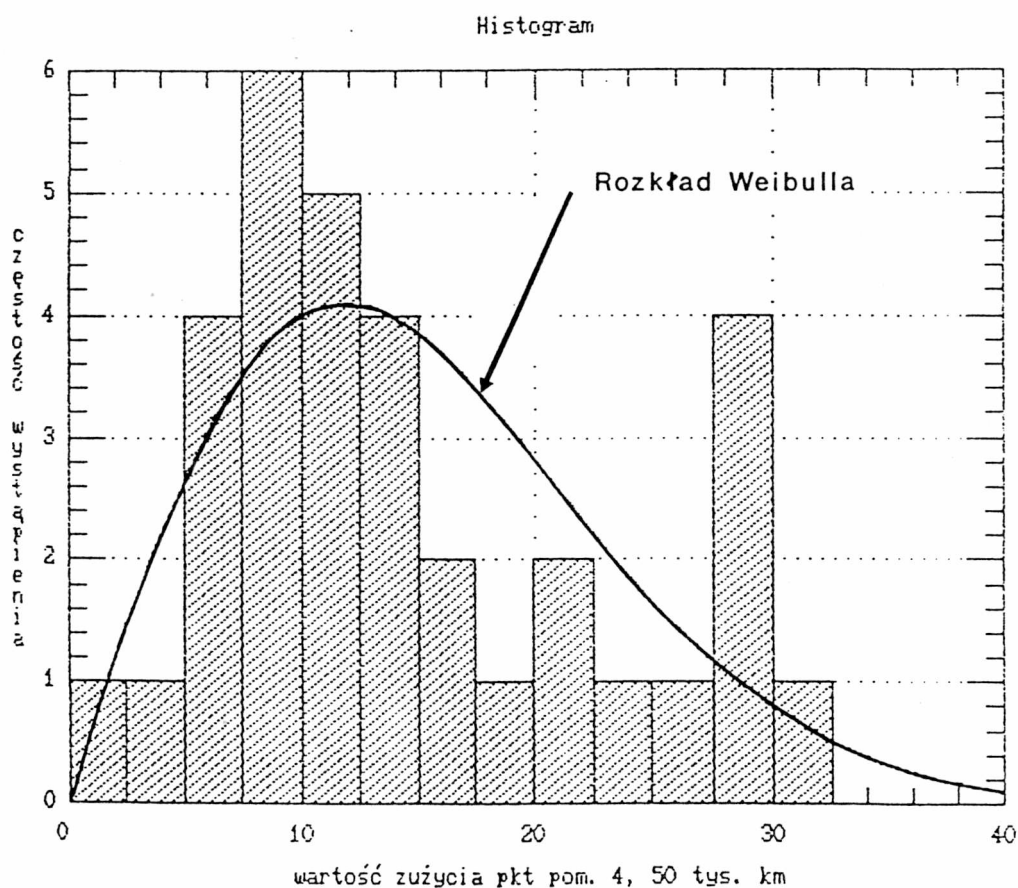
Test χ^2

	dolna granica	górna granica	częstość obserwowana	częstość oczekiwana	χ^2
w lub ponad		7.50	6	6	0.000990
	7.50	12.50	11	8	1.267340
	12.50	17.50	6	8	0.352020
	17.50	22.50	3	6	1.243372
ponad	22.50		7	6	0.189374

$\chi^2 = 3.05310$ z 2 stopniami swobody; poziom istotności = 0.217285

$$\alpha_k = 1.9658$$

$$\beta = 17.1012$$



Rys. 27. Rozkład częstości występowania wartości zużycia po przebiegu 50 tys. km, dopasowany rozkład Weibulla dla kierunku pom. nr 4 oraz parametry testu χ^2 .

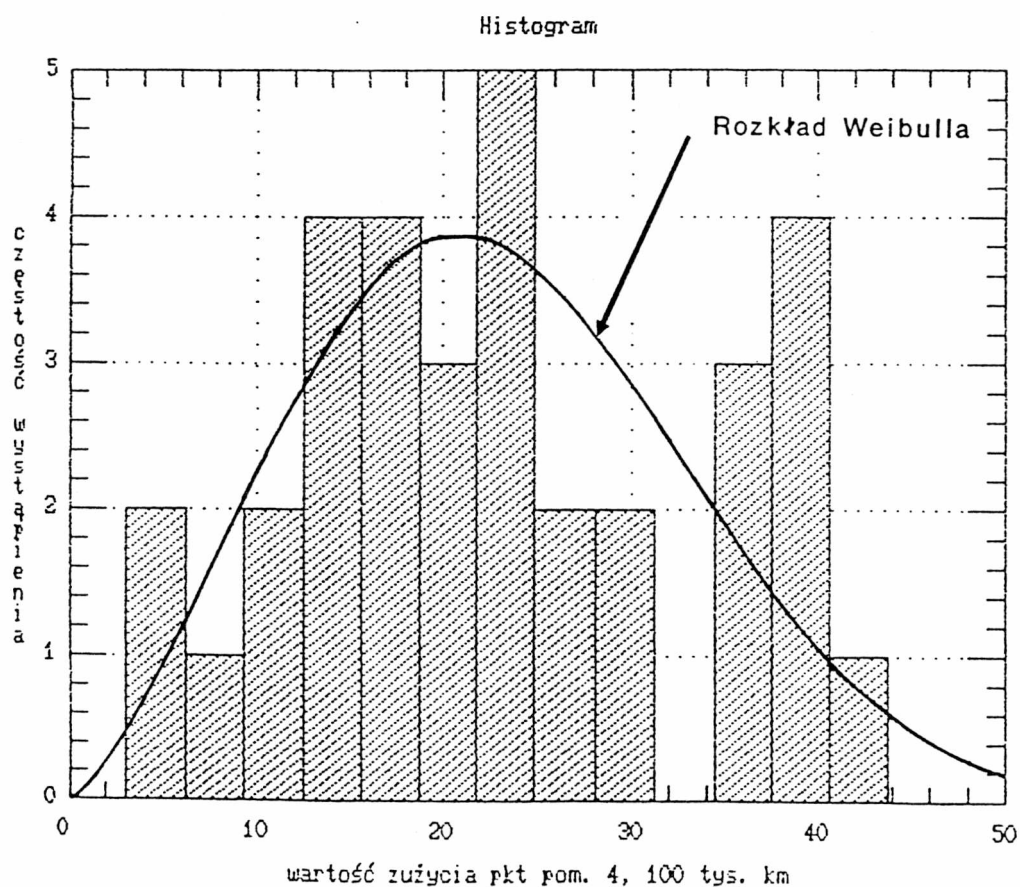
Test χ^2

	dolna granica	górną granica	częstość obserwowana	częstość oczekiwana	χ^2
w lub ponad	12.50	18.75	5	5	0.00529
12.50	18.75	25.00	8	7	0.19806
18.75	25.00	31.25	8	8	0.01746
25.00	31.25		4	6	0.86431
ponad 31.25			8	7	0.13610

$\chi^2 = 1.22122$ z 2 stopniami swobody; poziom istotności = 0.54302

$$\alpha_k = 2.40887$$

$$\beta = 26.0699$$



Rys. 28. Rozkład częstości występowania wartości zużycia po przebiegu 100 tys. km, dopasowany rozkład Weibulla dla kierunku pom. nr 4 oraz parametry testu χ^2 .

Wielkość	przebieg 50 tys. km	przebieg 100 tys. km
liczność zbioru	33	33
wartość średnia	14.3636	23.0727
mediana	12	20
wartość modalna	11	15
średnia geometr.	12.5	20.8603
wariancja	63.3011	110.185
odchylenie standardowe	7.9562	10.4969
błąd standardowy	1.385	1.82727
minimum	5	8
maksimum	36	48
różnica wartości	31	40
dolny kwartył	9	15
górny kwartył	18	28
różnica międzykwart.	9	13
skośność	1.10866	0.75834
skośność standaryzowana	2.60003	1.77847
kurtoza	0.630959	-0.0658158
kurtoza standaryzowana	0.739865	-0.0771759

Rys. 29. Wartości statystyk obliczone dla kierunku pomiarowego nr 1 po przebiegu 50 i 100 tys. km.

Wielkość	przebieg 50 tys. km	przebieg 100 tys. km
liczność zbioru	33	33
wartość średnia	14.4061	25.3061
mediana	12	21
wartość modalna	6	8
średnia geometr.	9.98728	19.8408
wariancja	150.379	301.16
odchylenie standardowe	12.2629	17.354
błąd standardowy	2.1347	3.02094
minimum	1	4.5
maksimum	52	65
różnica wartości	51	60.5
dolny kwartył	6	11
górny kwartył	18	35
różnica międzykwart.	12	24
skośność	1.60987	0.876373
skośność standaryzowana	3.77548	2.05528
kurtoza	2.51251	-0.23957
kurtoza standaryzowana	2.94618	-0.280921

Rys. 30. Wartości statystyk obliczone dla kierunku pomiarowego nr 2 po przebiegu 50 i 100 tys. km.

Wielkość	przebieg 50 tys. km	przebieg 100 tys. km
liczność zbioru	33	33
wartość średnia	16.4667	26.8697
mediana	13	27
wartość modalna	11	32
średnia geometr.	13.4632	22.8802
wariancja	94.4617	176.953
odchylenie standardowe	9.71914	13.3024
błąd standardowy	1.69188	2.31564
minimum	2.4	4
maksimum	37	60
różnica wartości	34.6	56
dolny kwartył	10	19
górny kwartył	22	35
różnica międzykwart.	12	16
skośność	0.607586	0.333428
skośność standaryzowana	1.42492	0.781957
kurtoza	-0.608219	-0.0860562
kurtoza standaryzowana	-0.7132	-0.10091

Rys. 31. Wartości statystyk obliczone dla kierunku pomiarowego nr 3 po przebiegu 50 i 100 tys. km.

Wielkość	przebieg 50 tys. km	przebieg 100 tys. km
liczność zbioru	33	33
wartość średnia	15.097	23.0788
mediana	12	22
wartość modalna	9	35
średnia geometr.	12.8924	20.3694
wariancja	68.9903	110.375
odchylenie standardowe	8.30604	10.5059
błąd standardowy	1.4459	1.82885
minimum	2.4	4.6
maksimum	31	41
różnica wartości	28.6	36.4
dolny kwartył	9	15
górny kwartył	21	30
różnica międzykwart.	12	15
skośność	0.695119	0.152318
skośność standaryzowana	1.6302	0.357216
kurtoza	-0.697551	-1.03323
kurtoza standaryzowana	-0.817951	-1.21157

Rys. 32. Wartości statystyk obliczone dla kierunku pomiarowego nr 4 po przebiegu 50 i 100 tys. km

6.2.2.1. Uwagi na temat dopasowania rozkładów statystycznych
do wartości zużycia tulei cylindrowych.

Kierunek pomiarowy nr 1.

Dane po przebiegu 50 tys. km.

Wartości parametrów rozkładu Weibulla są następujące:

$$\alpha_k = 1.97207$$

$$\beta = 16.3057$$

Dopasowanie rozkładu Weibulla do danych pomiarowych sprawdzono przy pomocy testu χ^2 . Wartość statystyki $\chi^2 = 2.37032$ świadczy o zadowalającym dopasowaniu, wartość statystyki $\chi^2 = 0$ świadczy o całkowitej zgodności danych pomiarowych z dopasowanym rozkładem.

Wartość poziomu istotności wynosi 0.305698 to znaczy, że odrzucając hipotezę o dopasowaniu rozkładu Weibulla do danych pomiarowych popełnionoby błąd nie większy niż 30.5698 %. Dopasowanie powyższego rozkładu, z uwagi na wartości testu χ^2 , można określić jako zadowalające.

Dane po przebiegu 100 tys. km.

Wartości parametrów rozkładu Weibulla są następujące:

$$\alpha_k = 2.39576,$$

$$\beta = 26.1252.$$

Wartość statystyki $\chi^2 = 1.29077$ świadczy o dobrym dopasowaniu rozkładu do danych pomiarowych. Potwierdzenie tego faktu znajduje w wartości poziomu istotności wynoszącej 0.534461, to znaczy, że odrzucając hipotezę o dopasowaniu rozkładu Weibulla do danych pomiarowych popełnionoby błąd nie większy niż 53.4461 %. Dopasowanie rozkładu można określić jako dobre.

Analiza rozkładu wartości zużycia po przebiegu 50 i 100 tys. km pozwala wysnuć następujące wnioski:

1. Daje się stwierdzić wyraźne oddalanie się wartości modalnej od

wartości średniej zużycia po przebiegu 100 tys. km w stosunku do przebiegu 50 tys. km. Przy czym wartość średnia po 50 tys. km wynosi $14.36 \mu\text{m}$, a wartość modalna $11 \mu\text{m}$. Po przebiegu 100 tys. km wartość średnia wynosi $23.07 \mu\text{m}$, a wartość modalna $15 \mu\text{m}$. Wartości najbardziej prawdopodobne oddalają się zatem po przebiegu 100 tys. km. od wartości średnich w kierunku wartości niższych.

2. Wartość skośności wyraźnie zmalała po przebiegu 100 tys. km ($0,75834$) w stosunku do przebiegu 50 tys. km (1.10866). Świadczy to o zmniejszeniu się asymetrii rozkładu (skośność dla rozkładu normalnego wynosi 0).
3. Wartość kurtozy wyraźnie maleje. Po przebiegu 50 tys. km wynosi: $0,630959$, a po przebiegu 100 tys. km: $-0,0658158$. Parametr ten informuje o spłaszczeniu rozkładu. Dla rozkładu normalnego jego wartość jest równa 3. Im mniejsze wartości tego współczynnika, tym spłaszczenie jest większe.

Podsumowując, rozkład wartości zużycia tulei cylindrowych w kierunku pomiarowym nr 1 zmierza w stronę bardzo spłaszczonego rozkładu Weibulla z nieznaczną tendencją do asymetrii w kierunku wyższych wartości zużycia od wartości średniej oraz częstszego występowania niższych wartości zużycia od wartości średniej.

Kierunek pomiarowy nr 2.

Dane po przebiegu 50 tys. km.

Wartości parametrów rozkładu Weibulla są następujące:

$$\alpha_k = 1.25316$$

$$\beta = 15.5251$$

Wartość statystyki $\chi^2 = 3.34162$ świadczy o zadowalającym dopasowaniu rozkładu do wartości zużycia w kierunku pomiarowym drugim po przebiegu 50 tys. km. Potwierdzeniem tego faktu jest wartość poziomu istotności $\alpha = 0.188094$. Oznacza to, że odrzucając hipotezę o dopasowaniu rozkładu do wartości wyników pomiarów popełnionoby błąd nie większy niż 18.8094 %.

Dopasowanie rozkładu Weibulla do wartości wyników pomiarów po przebiegu 50 tys.km można określić jako zadowalające.

Dane po przebiegu 100 tys. km.

Wartości parametrów rozkładu Weibulla są następujące:

$$\alpha_k = 1.55726$$

$$\beta = 28.3077$$

Wartość statystyki χ^2 oceniającej dopasowanie rozkładu Weibulla do wyników pomiarów wynosi $\chi^2 = 1.45928$. Świadczy ona o dobrym dopasowaniu rozkładu. Fakt ten potwierdza wartość poziomu istotności $\alpha = 0.482082$. Wartość ta oznacza, że odrzucając hipotezę o prawidłowym dopasowaniu rozkładu do wyników pomiarów popełnionoby błąd nie większy niż 48.2082 %.

Dopasowanie rozkładu Weibulla do wartości wyników pomiarów w kierunku pomiarowym nr 2 można określić jako dobre.

Rozkład wartości zużycia w drugim kierunku pomiarowym pozwala wysnuć następujące wnioski:

1. Wartość modalna po przebiegu 100 tys. km oddala się od wartości średniej w stosunku do przebiegu po 50 tys. km. Wartość średnia po 50 tys. km wynosi: 14.4061 μm , a wartość modalna: 6 μm . Po przebiegu 100 tys. km wartość średnia wynosi: 25.3061 μm , a wartość modalna: 8 μm . Wartości najbardziej prawdopodobne po przebiegu 100 tys. km oddalają się od wartości średnich w kierunku wartości niższych.
2. Wartość skośności po przebiegu 100 tys. km wyraźnie zmalała w stosunku do przebiegu 50 tys. km. Skośność po 50 tys. km wynosi: 1.60987, a po przebiegu 100 tys. km: 0.876373. Zjawisko to świadczy o zmniejszeniu się asymetrii rozkładu.
3. Wartość kurtozy po przebiegu 100 tys. km wyraźnie zmalała w stosunku do przebiegu 50 tys. km i wynosi po przebiegu 50 tys. km: 2.51251, a po przebiegu 100 tys. km: -0.23957. Mogę stąd wnioskować o tendencji w kierunku spłaszczenia rozkładu.

Podsumowując można stwierdzić, że charakter rozkładu wartości zużycia tulei cylindrowych w drugim kierunku pomiarowym zmierza w stronę bardzo spłaszczonego rozkładu Weibulla z tendencją do występowania wartości skrajnych większych od wartości średnich oraz do częstszego występowania wartości mniejszych od wartości średniej.

Kierunek pomiarowy nr 3.

Dane po przebiegu 50 tys. km.

Wartości parametrów rozkładu Weibulla są następujące:

$$\alpha_k = 1.79469$$

$$\beta = 18.5336$$

Wartość statystyki $\chi^2 = 1.05895$ świadczy o dobrym dopasowaniu rozkładu do wyników pomiarów. Potwierdzeniem tego faktu jest wartość poziomu istotności wynoszącej: $\alpha = 0.588915$. Oznacza to, że odrzucając hipotezę o prawidłowym dopasowaniu rozkładu popełnionoby błąd nie większy niż 58.8915 %.

Dopasowanie rozkładu Weibulla do wyników pomiarów wartości zużycia tulei cylindrowych w kierunku pomiarowym nr 3 po przebiegu 50 tys. km można określić jako dobrą.

Dane po przebiegu 100 tys. km.

Wartości parametrów rozkładu Weibulla są następujące:

$$\alpha_k = 2.14359$$

$$\beta = 30.2742$$

Wartość statystyki $\chi^2 = 0.8538$ świadczy o dobrym dopasowaniu rozkładu Weibulla do wyników pomiarów wartości zużycia. Potwierdzenie tego faktu można znaleźć w wartości poziomu istotności wynoszącej $\alpha = 0.652529$. Oznacza to, że odrzucając hipotezę o prawidłowym dopasowaniu rozkładu Weibulla do wyników pomiarów wartości zużycia popełnionoby błąd nie większy niż 65.2529 %.

Dopasowanie rozkładu Weibulla do wyników pomiarów wartości zużycia po przebiegu 100 tys. km w kierunku pomiarowym nr 3 można ocenić jako dobre.

Rozkład wartości zużycia w kierunku pomiarowym nr 3 po przebiegu 100 tys. km pozwala wysnuć następujące wnioski:

1. Wartość modalna po przebiegu 50 tys. km jest mniejsza od wartości średniej równej: $16.4667 \mu\text{m}$ i wynosi: $11 \mu\text{m}$. Po przebiegu 100 tys. km wartość średnia wynosi: $26.8697 \mu\text{m}$, natomiast wartość modalna równa jest: $32 \mu\text{m}$. Fakt ten świadczy o częstszym

występowaniu dużych wartości zużycia. Wartości najbardziej prawdopodobne oddalają się od wartości średniej w kierunku wyższych wartości zużycia.

2. Wartość skośności po przebiegu 100 tys. km wynosząca: 0.333428 jest niższa od wartości skośności po przebiegu 50 tys. km wynoszącej: 0.607586. Zjawisko to świadczy o zmniejszeniu się asymetrii rozkładu.
3. Wartość kurtozy po przebiegu 100 tys. km wynosząca: -0.23957 jest niższa od wartości po przebiegu 50 tys. km równej: 2.51251. Oznacza to występowanie tendencji do spłaszczenia rozkładu.

Podsumowując można stwierdzić, że charakter rozkładu wartości zużycia tulei cylindrowych w trzecim kierunku pomiarowym zmierza w stronę bardzo spłaszczonego rozkładu Weibulla z tendencją do występowania wartości skrajnych większych od wartości średnich oraz do częstszego występowania wartości większych od wartości średniej.

Kierunek pomiarowy nr 4.

Dane po przebiegu 50 tys. km.

Wartości parametrów rozkładu Weibulla są następujące:

$$\alpha_k = 1.9658$$

$$\beta = 17.1012$$

Wartość statystyki $\chi^2 = 3.0531$ świadczy o zadowalającym dopasowaniu rozkładu do wyników pomiarów. Potwierdzenie tego faktu można znaleźć w wartości poziomu istotności wynoszącej: $\alpha = 0.217285$. Oznacza to, że odrzucając hipotezę o prawidłowym dopasowaniu rozkładu popełnionyby błąd nie większy niż 21.7285 %.

Procedurę dopasowania rozkładu Weibulla do wyników pomiarów wartości zużycia tulei cylindrowych w kierunku pomiarowym nr 4 po przebiegu 50 tys. km można określić jako zadowalającą.

Dane po przebiegu 100 tys. km.

Wartości parametrów rozkładu Weibulla są następujące:

$$\alpha_k = 2.40887$$

$$\beta = 26.0699$$

Wartość statystyki χ^2 oceniającej dopasowanie rozkładu Weibulla do wyników pomiarów wynosi $\chi^2 = 1.22122$. Świadczy ona o dobrym dopasowaniu rozkładu. Fakt ten potwierdza wartość poziomu istotności $\alpha = 0.54302$. Wartość ta oznacza, że odrzucając hipotezę o prawidłowym dopasowaniu rozkładu do wyników pomiarów popełnionoby błąd nie większy niż 54.302 %.

Dopasowanie rozkładu Weibulla do wartości wyników pomiarów po przebiegu 100 tys.km w kierunku pomiarowym nr 4 można określić jako dobrą.

Rozkład wartości zużycia w kierunku pomiarowym nr 4 po przebiegu 100 tys. km pozwala wysnuć następujące wnioski:

1. Wartość modalna po przebiegu 50 tys. km jest mniejsza od wartości średniej równej: 15.097 μm i wynosi: 9 μm . Po przebiegu 100 tys. km wartość średnia wynosi: 23.0788 μm , natomiast wartość modalna równa jest: 35 μm . Fakt ten świadczy o częstszym występowaniu dużych wartości zużycia. Wartości najbardziej prawdopodobne oddalają się od wartości średniej w kierunku wyższych wartości zużycia.
2. Wartość skośności po przebiegu 100 tys. km wynosząca: 0.152318 jest niższa od wartości skośności po przebiegu 50 tys. km wynoszącej: 0.695119. Zjawisko to świadczy o zmniejszeniu się asymetrii rozkładu.
3. Wartość kurtozy po przebiegu 100 tys. km wynosząca: -1.03323 jest niższa od wartości po przebiegu 50 tys. km równej: -0.697551. Oznacza to występowanie tendencji do spłaszczenia rozkładu.

Podsumowując można stwierdzić, że charakter rozkładu wartości zużycia tulei cylindrowych w czwartym kierunku pomiarowym zmierza w stronę bardzo spłaszczonego rozkładu Weibulla z tendencją do występowania wartości skrajnych większych od wartości średnich oraz do częstszego występowania wartości większych od wartości średniej.

Przeprowadzone analizy wartości zużycia tulei cylindrowych w poszczególnych kierunkach pomiarowych pozwalają na sformułowanie następujących uwag:

- najlepiej dopasowanym rozkładem do wyników pomiarów wartości zużycia tulei cylindrowych w czterech kierunkach pomiarowych po przebiegu 50 tys. km jest rozkład Weibulla.
- najlepiej dopasowanym rozkładem do wyników pomiarów po przebiegu 100 tys. km w czterech kierunkach pomiarowych jest rozkład Weibulla.
- w trzecim kierunku pomiarowym po przebiegu 50 tys. km wartość parametru " β " rozkładu Weibulla dopasowanego do wyników pomiarów jest większa od wartości tego parametru w pozostałych kierunkach średnio o 17%.
- wartość parametru " β " rozkładu Weibulla dopasowanego do wyników pomiarów w trzecim kierunku pomiarowym po przebiegu 100 tys. km jest większa od wartości tego parametru w pozostałych kierunkach pomiarowych średnio o 15%.
- większe wartości parametru " β " rozkładu Weibulla dowodzą tendencji występowania wyższych wartości zużycia w trzecim kierunku pomiarowym.

6.2.3. Analiza regresji wartości zużycia w trzecim kierunku pomiarowym.

Czynnikami wymuszającymi są zgodnie z rozważaniami przeprowadzonymi w punkcie 3.2 oraz 7.2.1 wartości parametrów R_q , R_{sk} oraz R_{ku} w trzecim kierunku pomiarowym chromowanych tulei cylindrowych (tabela 9). Odpowiedzią obiektu są wartości zużycia chromowanych tulei cylindrowych po 50 oraz 100 tys. km przebiegu zmierzone metodą replik w GMP pierwszego pierścienia uszczelniającego w trzecim kierunku pomiarowym (tabela 9).

Tabela 9.

Wartości parametrów chropowatości oraz zużycia chromowanych tulei cylindrowych w trzecim kierunku pomiarowym.

Lp.	R_q	R_{sk}	R_{ku}	wartość zużycia, μm 50 tys. km	wartość zużycia, μm 100 tys. km
1	0.76	-1.4	4.8	13	22
2	0.82	-0.7	3.3	10	21
3	1.42	-0.8	3.8	13	23
4	1.17	-1.6	3.2	15	27
5	1.78	-0.6	3.4	11	19
6	1.27	-0.5	6.8	11	21
7	1.13	-0.3	2.7	6	12
8	1.19	-0.8	2.9	11	17
9	1.32	-1.4	5.6	6	9
10	0.98	-1.8	7.8	4	7
11	1.16	-0.3	2.6	17	32
12	0.86	-0.8	9.3	30	60
13	1.16	-0.6	9.2	20	38
14	0.96	-1.4	7.6	11	22
15	1.19	-1.2	9.1	10	29
16	1.25	-0.5	6.8	12	27
17	1.24	-0.8	8.1	22	30
18	0.95	-1.2	4.7	10	20
19	0.93	-0.8	7.5	6	30
20	0.74	-1.6	5.1	3	4
21	1.37	-0.9	2.4	2	4
22	0.71	-0.8	2.5	29	35
23	1.66	-0.9	3.6	37	44
24	1.07	-1.0	8.9	35	48
25	0.74	-1.6	7.8	17	19
26	0.94	-1.3	9.3	21	37
27	0.90	-1.4	7.9	16	20
28	1.29	-0.7	9.2	18	32
29	1.04	-0.7	8.3	34	44
30	1.38	-0.4	2.6	26	32
31	1.11	-0.7	3.4	11	14
32	1.24	-0.5	8.6	29	41
33	0.98	-1.0	9.3	27	46

W tabeli 9 przedstawiono wartości czynników wymuszających oraz odpowiedzi obiektu. Jest to tablica obserwacji wejść i wyjść obiektu [41]. Wyniki podane w tablicy obserwacji służą do utworzenia macierzy wejść. Macierz wejść (X) tworzą w tym wypadku kolumny R_q , R_{sk} oraz R_{ku} . W celu ujednolicenia zapisu macierzowego wprowadza się dodatkowo kolumnę elementów fikcyjnych o wartościach równych jedności umieszczona jako pierwsza.

Wyniki obserwacji wyjść obiektu oraz wyjść modelu można zapisać w postaci wektorów wyjść obiektu i wyjść modelu. [6]. Tu wartości wyjść obiektu zawierają kolumny wartości zużycia po przebiegu 50 oraz 100 tys.

km. Ogólnie wektor wyjść obiektu można zapisać jak (104). Natomiast ogólny zapis dla wyjść modelu przedstawia (105).

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_{33}]^T \quad (104)$$

$$\hat{\mathbf{y}} = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_{33}]^T \quad (105)$$

W analizie regresji poszukuje się wartości wektora parametrów $\mathbf{b}$ postaci:

$$\mathbf{b} = [b_0, b_1, \dots, b_s] \quad (106)$$

W celu wyliczenia wartości elementów wektora $\mathbf{b}$ należy wykonać następujące działanie:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (107)$$

Funkcję aproksymującą zakłada się w postaci eksponentyjnej:

$$\begin{aligned} \hat{z} = \exp(b_0 + b_1 \hat{R}_q + b_2 \hat{R}_{sk} + b_3 \hat{R}_{ku} + b_{11} \hat{R}_q^2 + b_{22} \hat{R}_{sk}^2 + b_{33} \hat{R}_{ku}^2 + \\ + b_{12} \hat{R}_q \hat{R}_{sk} + b_{13} \hat{R}_q \hat{R}_{ku} + b_{23} \hat{R}_{sk} \hat{R}_{ku}) \end{aligned} \quad (108)$$

W celu przeprowadzenia analizy regresji wykorzystano pakiet zintegrowany STATGRAPHIX. W celu sprawdzenia związku pomiędzy wyjściem obiektu $\mathbf{y}$ i wyjściem modelu $\hat{\mathbf{y}}$ obliczono współczynnik korelacji wielowymiarowej R^2 postaci:

$$R^2 = \frac{\mathbf{b}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} - N \bar{y}^2}{\mathbf{y}^T \mathbf{y} - N \bar{y}^2} \quad (109)$$

Tabela 10

Wartości wyjścia obiektu y (wartość zużycia po przebiegu 50 tys. km; z_{50} oraz 100 tys. km; z_{100}) oraz wartości wyjścia modelu $\hat{y}$ ($\hat{z}_{50}$ po przebiegu 50 tys. km, $\hat{z}_{100}$ po przebiegu 100 tys. km) oraz odpowiednie błędy bezwzględne dopasowania modelu.

Lp.	z_{50} μm	$\hat{z}_{50}$ μm	Δz_{50} %	z_{100} μm	$\hat{z}_{100}$ μm	Δz_{100} %
1	13	8.494	34.66	22	13.339	39.36
2	10	12.096	20.96	21	19.251	8.33
3	13	11.910	8.38	23	18.631	18.99
4	15	6.278	58.14	27	10.072	62.69
5	11	12.676	15.23	19	20.822	9.59
6	11	17.865	62.41	21	32.547	54.99
7	6	13.283	121.38	12	24.616	105.13
8	11	11.288	2.62	17	17.453	2.67
9	6	9.147	52.46	9	14.597	62.19
10	4	7.955	98.88	7	15.108	115.82
11	17	13.221	22.23	32	24.475	23.51
12	30	22.614	24.62	60	40.646	32.26
13	20	24.289	21.45	38	45.937	20.89
14	11	11.569	5.18	22	19.427	11.69
15	10	17.024	70.24	29	29.379	1.31
16	12	17.865	48.88	27	32.548	20.55
17	22	18.780	14.64	30	32.422	8.07
18	10	9.917	0.83	20	15.224	23.88
19	6	17.279	187.98	30	29.297	2.34
20	3	7.224	140.81	4	11.947	198.68
21	2	10.452	335.49	4	15.794	267.31
22	29	11.073	61.82	35	17.050	51.28
23	37	11.143	69.88	44	17.075	61.19
24	35	18.930	45.91	48	32.579	32.13
25	17	9.849	42.06	19	17.420	8.32
26	21	16.262	22.56	37	28.472	23.05
27	16	12.059	24.63	20	20.430	2.15
28	18	23.318	29.54	32	42.780	33.69
29	34	20.268	40.39	44	36.073	18.02
30	26	12.933	50.26	32	22.793	28.77
31	11	12.169	10.63	14	19.392	34.66
32	29	22.864	21.16	41	43.940	7.17
33	27	20.197	25.20	46	35.252	23.37

Otrzymane funkcje aproksymujące wartość zużycia oraz współczynniki korelacji wielowymiarowej R^2 są następujące:

Po przebiegu 50 tys. km:

$$\hat{z}_{50} = \exp(2.549 + 0.314R_{sk}^2 + 0.009R_{ku}^2), \quad (110)$$

$$R_{50}^2 = 0.266 \quad (111)$$

Po przebiegu 100 tys. km:

$$\hat{z}_{100} = \exp(3.338 + 0.712R_{sk} + 0.011R_{ku}^2), \quad (112)$$

$$R_{100}^2 = 0.391 \quad (113)$$

W tabeli 10 zamieszczono wartości wyjść obiektu y oraz odpowiednie wartości wyjść modelu $\hat{y}$ oraz błąd bezwzględny pomiędzy tymi wartościami. Błąd bezwzględny liczony jest według wzoru:

$$\Delta z = \left| \frac{z - \hat{z}}{z} \right| 100\% \quad (114)$$

Na podstawie powyższego zestawienia można określić średni błąd dopasowania równy 54.29% po przebiegu 50 tys. km oraz 42.85% po przebiegu 100 tys. km.

Małe wartości współczynników korelacji R_{50}^2 oraz R_{100}^2 oraz duży średni błąd dopasowania wskazują na mały związek pomiędzy wyjściem obiektu a wyjściem modelu. Niezbędnym staje się podjęcie kroków zmierzających do znalezienia ściślejszych powiązań pomiędzy tymi wielkościami.

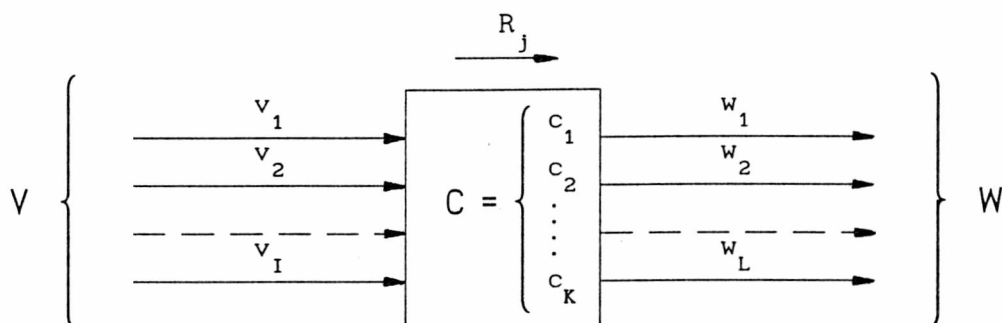
Z przeprowadzonych obliczeń analizy regresji wynika, że analiza post factum wyników badań eksploatacyjnych wartości zużycia chromowanych tulei cylindrowych po przebiegu 50 oraz 100 tys. km nie pozwala na sformułowanie istotnych zależności matematycznych pomiędzy wartościami parametrów chropowatości i wartością zużycia tulei cylindrowych.

Koniecznym jest zaproponowanie systemowej metody prowadzenia badań trwałościowych węzła TPC i na jej podstawie określenia wspomnianych zależności matematycznych.

7. METODA PROWADZENIA BADAŃ TRWAŁOŚCIOWYCH WĘZŁA TPC.

7.1. Schemat procesu zużycia.

Procesem nazywamy dynamiczną zmianę energomaterii lub informacji zachodzącą w czasie [45]. W tym rozumieniu procesem jest również zużycie węzła TPC silników spalinowych. Schematycznie można przedstawić proces jak na rys. 33.



Rys. 33. Graficzne przedstawienie procesu [67].

Poszczególne wielkości na rysunku mają następujące znaczenie:

v_i - odwzorowanie wejść $v_i(t)$ obrazujące zgodnie z przyjętą teorią lub hipotezą rzeczywistą realizację wejść $\{v_i\} = V$, ($i = \overline{1, I}$),

w_l - odwzorowanie zgodnie z przyjętą teorią lub hipotezą realizacji rzeczywistych wyjść $\{w_l\} = W$, ($l = \overline{1, L}$),

c_k - charakterystyki obiektu, opisujące zgodnie z przyjętą teorią lub hipotezą własności obiektu rzeczywistego $\{c_k\} = C$, ($k = \overline{1, K}$),

R_j - relacje między V , C i W .

Modelem matematycznym procesu nazywa się uporządkowaną czwórkę:

$$E_M = \{ V, C, W, R \} \quad (115)$$

Po ustaleniu wielkości wejść i wyjść można mówić o pewnych realizacjach procesu [8]. Realizacje procesu determinuje zatem istnienie dwóch niepustych zbiorów odwzorowań rzeczywistych wejść i wyjść takich, że każdej realizacji $v_i \in V \neq \emptyset$ ($\emptyset$ - zbiór pusty) odpowiada obserwowana

realizacja:

$$\{v_i \in V\} \Rightarrow \{w_i \in W\} \quad (116)$$

Zapis formalny (116) jest prawdziwy, gdy realizacja procesu przebiega w jednym, konkretnym obiekcie. Cechy obiektu C występują wtedy w postaci niejawnej w R . Model matematyczny procesu zużycia przedstawia się następująco:

$$E_0 = \{V, W, R\} \quad (117)$$

Najczęściej jednak badania procesu zużycia są prowadzone na pewnym zbiorze obiektów rzeczywistych, z których każdy ma inną realizację cech. Ten typ badań jest również dominujący w badaniach trwałościowych silników. Cechy obiektu występują wtedy w postaci jawnej, a poprzez ich zmianę można ingerować w przebieg procesu zużycia, czyli możliwe jest sterowanie wyjściami poprzez zmianę wejść i cech obiektu. Pozwala to na optymalizację konstrukcji i technologii. Zapis (116) przekształca się w takim wypadku do postaci:

$$\{v_i \in V \wedge c_k \in C\} \Rightarrow \{w_i \in W\} \quad (118)$$

Znajomość modelu matematycznego procesu pozwala na sterowanie tym procesem, a w szczególności istnieje możliwość wyznaczenia ekstremów tego procesu np. minimalnej wartości zużycia.

Sterowanie procesem może się odbywać w ogólności poprzez zmianę wartości $\{v_i\}$ lub $\{c_k\}$. Stosując przedstawiony na rys. 33 ogólny schemat procesu do realnych warunków procesu zużycia węzła TPC otrzymuje się schemat zamieszczony na rys. 34.

Wektor wielkości wejściowych V można rozłożyć na dwa:

- wektor S zawierający wielkości będące parametrami silnika;

$$S = \{v_{tl}(t), p_{max}(t), \alpha_{ww}(t), p_{ol}, \tau_s, p_e, dQ/d\alpha, \dots\}$$

$v_{tl}(t)$ - prędkość tłoka,

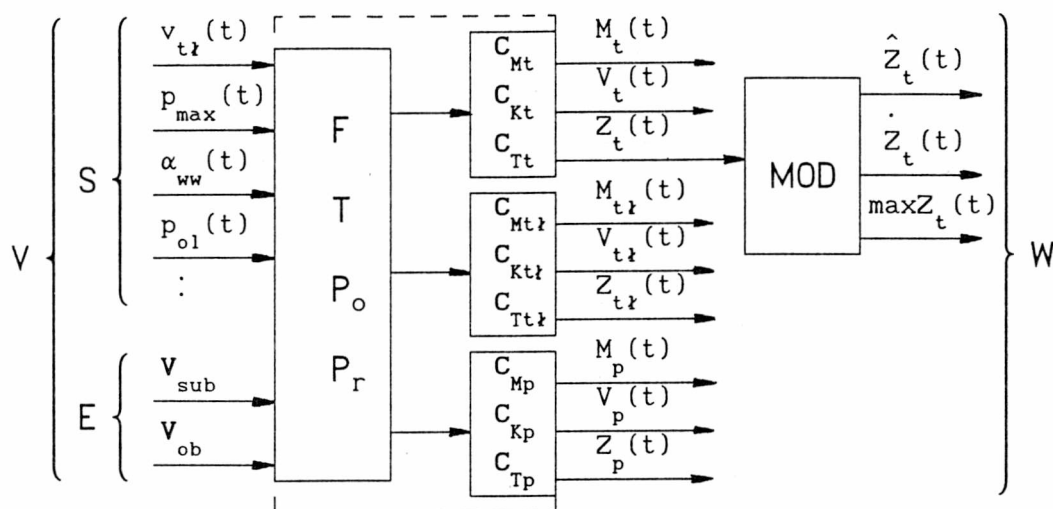
p_{max} - maksymalne ciśnienia spalania,

α_{ww} - kąt wyprzedzenia wtrysku,

p_{ol} - ciśnienie oleju,

τ_s - opóźnienie samozapłonu,

p_e - średnie ciśnienie użyteczne,
 $dQ/d\alpha$ - przebieg wywiązywania się ciepła,



Rys. 34. Schematyczne przedstawienie procesu zużycia węzła TPC.

- wektor E wymuszeń eksploatacyjnych, które można podzielić na:

- V_{sub} - czynniki subiektywne (będące zakłóceniami),
- V_{ob} - czynniki obiektywne,
 - - nieuwarunkowane działaniem obiektu,
 - - uwarunkowane działaniem obiektu,

Czynniki subiektywne wynikają ze świadomej lub nieświadomej działalności człowieka [20], [81]. Należą do nich takie wymuszenia jak: umiejętność organizacji procesu eksploatacji, kwalifikacje, doświadczenie, sumienność i staranność przejawiana w toku przedsięwzięć eksploatacyjnych. Czynniki te trudno jest ująć w postaci analitycznej, dlatego wprowadza się często pojęcie niezawodności operacyjnej uwzględniającej wpływ działalności człowieka.

Czynniki obiektywne są [71] uwarunkowane i nieuwarunkowane działaniem obiektu.

Czynniki uwarunkowane funkcjonowaniem obiektu wynikają z czynności wykonywanych przez obiekt. Ich wyeliminowanie nie jest oczywiście możliwe, gdyż ich występowanie wiąże się nierozłącznie z procesami fizycznymi zachodzącymi w obiekcie podczas pracy. Mam tu na myśli

wszelkie procesy fizyczne zachodzące podczas pracy pary tracej tuleja cylindrowa - pierścienie tłokowe.

Czynniki nieuwarunkowane funkcjonowaniem obiektu oddziałują na obiekt w wyniku samej swojej obecności w otoczeniu nawet wtedy, gdy system swoich funkcji nie wykonuje (np. korozja). Niektóre z tych czynników można usunąć przez odpowiednie rozwiązania konstrukcyjne obiektu i zastosowanie właściwych środków przeciwdziałających.

Wielkości wejściowe V działają na obiekt C . W wyniku tego oddziaływania następujące wielkości ulegają zmianie:

F - wektor sił występujących w węźle TPC,

T - wektor temperatur,

P_o - wektor parametrów ciśnienia w filmie olejowym pomiędzy pierścieniem i tuleją cylindrową,

P_r - wektor parametrów straty ładunku powstające w wyniku przedmuchów gazów do skrzyni korbowej.

Wielkości F , T , P_o , P_r oddziałują na elementy węzła TPC. Elementy węzła można scharakteryzować za pomocą następujących wektorów:

C_{Mt} - cech materiałowych tulei cylindrowej,

C_{Kt} - cech konstrukcyjnych tulei cylindrowej,

C_{Tt} - cech technologicznych tulei cylindrowej,

C_{Mt1} - cech materiałowych tłoka,

C_{Kt1} - cech konstrukcyjnych tłoka,

C_{Tt1} - cech technologicznych tłoka,

C_{Mp} - cech materiałowych pierścienia,

C_{Kp} - cech konstrukcyjnych pierścienia,

C_{Tp} - cech technologicznych pierścienia.

Cechy materiałowe tulei cylindrowej, tłoka oraz pierścienia obejmują parametry struktury.

Cechy konstrukcyjne tulei cylindrowej, tłoka oraz pierścienia obejmują wymiary makrogeometryczne.

Cechy technologiczne tulei cylindrowej, tłoka oraz pierścienia to przede wszystkim parametry opisujące mikrogeometrię warstwy wierzchniej wymienionych elementów.

W następstwie działania wielkości wejściowych na obiekt można zarejestrować wielkości wyjściowe W. W przypadku węzła TPC są to następujące wielkości:

$M_t(t)$ - kinetyka zużycia masowego tulei cylindrowej,
 $V_t(t)$ - kinetyka zużycia objętościowego tulei cylindrowej,
 $Z_t(t)$ - kinetyka zużycia liniowego tulei cylindrowej,
 $M_{t1}(t)$ - kinetyka zużycia masowego tłoka,
 $V_{t1}(t)$ - kinetyka zużycia objętościowego tłoka,
 $Z_{t1}(t)$ - kinetyka zużycia liniowego tłoka,
 $M_p(t)$ - kinetyka zużycia masowego pierścienia,
 $V_p(t)$ - kinetyka zużycia objętościowego pierścienia,
 $Z_p(t)$ - kinetyka zużycia liniowego pierścienia.

Zużycie masowe oraz zużycie objętościowe są ze sobą powiązane poprzez wartość gęstości zużytego materiału. Jednakże odpowiedź obiektu w postaci zużycia masowego lub objętościowego, w przypadku węzła TPC, nie jest miarodajną z powodów omówionych w punkcie 2.5. W tym przypadku miarodajną jest odpowiedź w postaci zużycia liniowego zarówno tulei cylindrowej, tłoka jak i pierścienia tłokowego.

Wartości odpowiedzi obiektu można powiązać z wartościami czynników wymuszających przy pomocy np. analizy regresji. Analizy tych funkcji polegają z reguły na poszukiwaniu optymalnych wartości wybranych czynników wymuszających poprzez poszukiwanie minimum modeli matematycznych. Na schemacie procesu zużycia węzła TPC przedstawionym na rys. 34 zamieszczono kolejny etap opracowania odpowiedzi obiektu przykładowo dla zużycia liniowego tulei cylindrowej. Etapem tym jest analiza regresji wiążąca odpowiedzi obiektu z czynnikami wymuszającymi. Jest ona zawarta w segmencie MOD.

W wyniku przeprowadzenia analizy regresji otrzymano model matematyczny; MOD, którego odpowiedziami są:

$\hat{Z}_t(t)$ - estymator kinetyki zużycia liniowego tulei cylindrowej,
 $\dot{Z}_t(t)$ - prędkość przyrostu zużycia liniowego tulei cylindrowej,
 $\max \dot{Z}_t(t)$ - ekstremum prędkości przyrostu zużycia liniowego tulei cylindrowej.

Ilość czynników wymuszających mających wpływ na wartości odpowiedzi

obiektu (węzła TPC) jest bardzo duża. Z tego powodu niemożliwa jest identyfikacja polegająca na bezpośrednim uwzględnieniu wpływu wszystkich czynników wymuszających. Ponadto, ze względów praktycznych, nie jest ona konieczna.

Możliwe jest sformułowanie pytania o wpływ wybranych czynników wymuszających na wybrane odpowiedzi obiektu. Przykładowo: czynnikiem wymuszającym jest wektor E , jako cechy obiektu przyjmuje się C_{Tt} , odpowiedzią obiektu jest $\max Z_t(t)$. Model matematyczny procesu przedstawia się wtedy w sposób następujący:

$$\max Z_t(t) = f(E, C_{Tt}) \quad (119)$$

Optymalizacja modelu sprowadza się do znalezienia minimum funkcji:

$$f(E, C_{Tt}) = \max Z_t(t) \text{ — Minimum} \quad (120)$$

7.2. Rodzaje badań procesu zużycia.

Można wyróżnić trzy rodzaje badań procesu zużycia silników spalinowych [67]:

- modelowe,
- stanowiskowe,
- eksploatacyjne.

O zaszeregowaniu do danego rodzaju badań procesu zużycia silników spalinowych decyduje sposób eksploatacji silnika spalinowego. Czyli jak realizowane jest widmo wymuszeń, cechy obiektu oraz co jest przyjmowane za odpowiedź obiektu.

Badania modelowe realizowane są przez zamodelowanie widma wymuszeń i cech obiektu.

Widmo wymuszeń, na które składają się stochastyczne przebiegi $v_i \in V$ ($i = 1, I$) modelowane jest za pomocą jednego lub co najwyżej kilku czynników wymuszających, których wartości przyjmuje się w odpowiedniej skali w stosunku do wartości występujących w silniku eksploatowanym w rzeczywistości;

$$v_s = \alpha_s \hat{v}_s \quad (121)$$

$\hat{v}_s$ - wartość modelowa wartości rzeczywistej v_s ,

α_s - skala.

$s = \overline{1, S}$ przy czym $S < I$

W badaniach modelowych modeluje się również cechy obiektu;

$$c_k = \alpha_0 \hat{c}_k \quad (122)$$

Formalny zapis badań modelowych może być następujący:

$$\{\alpha_s \hat{v}_s = v_s \in V \wedge \alpha_0 \hat{c}_k = c_k \in C\} \Rightarrow \{\lambda \hat{w}_1 = w_1 \in W \cap B\} \quad (123)$$

przy czym $\{B_p\} = B$ - zbiór odpowiedzi modelowych obiektu.

W wyniku działania na obiekt o modelowych cechach ($\hat{c}_k$), modelowych wymuszeń ($\hat{v}_s$) otrzymuje się w efekcie modelowe odpowiedzi obiektu ($\hat{w}_1$). Współczynnik α_s jest skalą pomiędzy rzeczywistymi i modelowymi wartościami czynników wymuszających. Podobnie α_0 jest skalą pomiędzy wartościami rzeczywistymi i modelowymi cech obiektu. Współczynnik λ skalę pomiędzy wartościami odpowiedzi obiektu eksploatowanego w badaniach eksploatacyjnych i badaniach modelowych. Odpowiedzi te nie zawsze są jakościowo takie same, jak odpowiedzi obiektu rzeczywistego. Dąży się jednak do tego, aby przynajmniej jedna z odpowiedzi obiektu była jakościowo taka sama, jak w innych rodzajach badań. W badaniach procesu zużycia jest nią najczęściej ubytek masy.

W **badaniach hamownianych** widmo wymuszeń modelowane jest za pomocą kilku czynników wymuszających, natomiast cechy obiektu nie są modelowane, jednakże ich kombinacje mogą zmieniać się i różnić między sobą w poszczególnych doświadczeniach. Odpowiedzi obiektu pozostają w ewnej proporcji do odpowiedzi obiektu rzeczywistego;

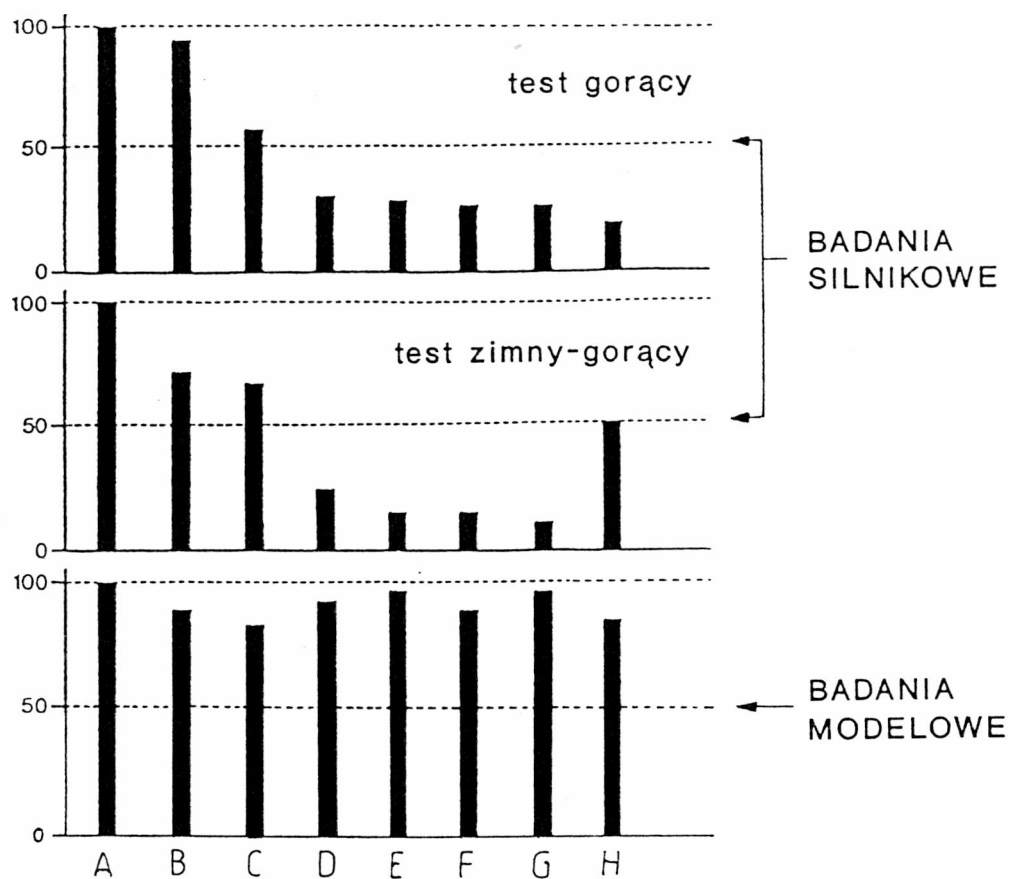
$$\{\alpha_s \hat{v}_s = v_s \in V \wedge c_k \in C\} \Rightarrow \{\lambda \hat{w}_1 = w_1 \in W\} \quad (124)$$

Badania eksploatacyjne można prowadzić jako przyspieszone i bez przyspieszenia.

Badania przyspieszone można zapisać formalnie tak jak (124), natomiast badania bez przyspieszenia można zapisać jak (118) z pkt. 7.1, czyli:

$$\{v_i \in V \wedge c_k \in C\} \Rightarrow \{w_l \in W\}$$

Powiązanie wyników badań prowadzonych na stanowiskach modelowych z wynikami badań eksploatacyjnych nie jest łatwe. System tribologiczny na stanowisku modelowym różni się od rzeczywistego. Prędkość zużycia w silniku jest rzędu 10 nm/h, a w badaniach modelowych jest ona 100 razy, a nawet 1000 razy większa [22].



Rys. 35. Porównanie względnych wartości zużycia w badaniach modelowych i silnikowych dla 8 wariantów materiałowych pary tracej pierścienie tłokowe - tuleja cylindrowa na podstawie [46].

Celem badań modelowych węzła TPC jest uzyskanie informacji na temat tendencji w zużyciu różnych par trących tuleja cylindrowa - pierścienie tłokowe. Jest to realizowane z pominięciem nieznanych zjawisk towarzyszących procesom spalania. W firmie Goetze podejmowane były próby prowadzenia badań symulacyjnych na stanowiskach modelowych opublikowane w pracy [77]. Godnymi przytoczenia są wyniki badań różnych wariantów materiałowych pary pierścienie tłokowe - tuleja cylindrowa poddanych próbom zużyciowym w badaniach silnikowych (silnik samochodu osobowego $V_{cc} = 2400 \text{ cm}^3$) i na stanowisku modelowym (rys. 35). Wartości zużycia dla wariantów A, B i C są znacznie większe niż pozostałych w przypadku badań silnikowych, co nie znajduje potwierdzenia w badaniach modelowych, gdzie wartości zużycia dla wszystkich wariantów są podobne.

Niedogodnością badań modelowych, hamownianych i przyspieszonych eksploatacyjnych jest konieczność określenia współczynnika λ (123). W przypadku badań procesu zużycia silników spalinowych i ich elementów zadanie to jest często niemożliwe do zrealizowania lub wymaga długoletnich obserwacji i porównywania wyników badań na stanowiskach modelowych i hamownianych z wynikami badań uzyskanymi w eksploatacji naturalnej. Należy podkreślić, że wartość współczynnika λ można określić dopiero po przeprowadzeniu wszystkich typów badań, łącznie z badaniami eksploatacyjnymi. Dopiero wówczas wyniki badań modelowych i hamownianych stają się wiarygodne.

7.3. Propozycja metody badań zużycia węzła TPC w ujęciu systemowym.

Badania zużycia węzła TPC silnika spalinowego są związane z dużymi nakładami. Czas oczekiwania na odpowiedź obiektu jest długi, a ilość eksperymentów, niezbędnych do uzyskania miarodajnych odpowiedzi, duża. Ponadto opracowanie wyników badań bez ich uprzedniego przygotowania nie daje oczekiwanych rezultatów, co pokazano w rozdziale 2.

Proponowana metoda prowadzenia badań zużycia węzła TPC pozwala na ograniczenie ilości eksperymentów oraz skrócenie sumarycznego czasu badań, a ponadto otrzymanie miarodajnych wyników.

7.3.1. Czynniki wymuszające

W procesie zużycia węzła TPC można wyróżnić następujące rodzaje czynników wymuszających [68]:

$\{v_s\}$, ($s = \overline{1, S}$) - kontrolowalne i sterowalne umożliwiające celowe oddziaływanie na proces; na przykład średnia prędkość tłoka,

$\{v_u\}$, ($u = \overline{1, U}$) - tylko kontrolowalne - dające się jedynie kontrolować; na przykład ciśnienie atmosferyczne (pod warunkiem nie prowadzenia badań w specjalnych komorach),

$\{v_z\}$, ($z = \overline{1, Z}$) - wielkości zakłócające, nie dające się kontrolować na drodze pomiaru; na przykład chwilowa grubość warstwy nagaru na denku tłoka.

Wynikiem działania wymuszeń na obiekt, jakim jest węzeł TPC są odpowiedzi obiektu $\{w_1\}$.

Modelem matematycznym procesu jest:

$$\{w_1\} = \Phi_1(\{v_s\}, \{v_u\}, \{v_z\}, \{c_k\}) \quad (125)$$

Należy zauważyć, że ustalenie wielkości $\{v_z\}$ jest praktycznie niemożliwe, w związku z tym zależność (125) ogranicza się do postaci:

$$\{w_1\} = \Phi_1(\{v_s\}, \{v_u\}, \{c_k\}) \quad (126)$$

Planowanie eksperymentu ogranicza się do czynników wymuszających typu v_s oraz cech obiektu c_k . Biorąc to pod uwagę model (126) ogranicza się do postaci:

$$\{w_1\} = \Phi_1(\{v_s\}, \{c_k\}) \quad (127)$$

Czynniki wymuszające typu v_u i v_z występują wówczas w postaci niejawnej w relacjach Φ_1 .

W badaniach modelowych zależność (127) w ujęciu systemowym przedstawia się następująco:

$$\{\hat{w}_1\} = \hat{\Phi}_1(\{\hat{v}_s\}, \{\hat{c}_k\}) \quad (128)$$

Podobnie w badaniach hamownianych:

$$\{w_1\} = \hat{\Phi}_1(\{\hat{v}_s\}, \{c_k\}) \quad (129)$$

W badaniach eksploatacyjnych, w których nie steruje się wartościami v_s przy powtarzającym się widmie wymuszeń co ma miejsce, gdy eksploatowany jest jeden typ silnika w określonym środowisku zależność (124) sprowadza się do postaci:

$$\{w_1\} = \Phi_1(\{c_k\}) \quad (130)$$

Wymuszenia działające na obiekt badań stanowią widmo wymuszeń ze stochastycznymi realizacjami. Przy czym w badaniach eksploatacyjnych czynniki wymuszające (v_s) nie podlegają planowaniu, z wyjątkiem rozdziału na poszczególne środowiska, w jakich eksploatowany jest silnik z rozpatrywanym węzłem TPC.

7.3.2. Obiekt badań.

Obiektem badań jest węzeł TPC silnika spalinowego. Cechy węzła TPC można podzielić na konstrukcyjne i technologiczno - materiałowe.

$$\{c_k\} = K \cup M \quad (131)$$

gdzie:

K - zbiór cech konstrukcyjnych obiektu,

M - zbiór cech technologiczno - materiałowych obiektu.

Cechy konstrukcyjne obiektu to wymiary makro- i mikrogeometryczne.

Zbiór cech technologiczno - materiałowych obiektu to zbiór cech technologiczno - materiałowych warstwy wierzchniej (WW) i rdzenia.

Stan warstwy wierzchniej elementu zdeterminowany jest chwilowymi wartościami współrzędnych wektora S_{ww} funkcji losowych, opisanych na zbiorze parametrów S_j :

$$s_{ww} \overset{V}{\in} S_{ww} \{S_j\} \wedge s_{ww} \overset{V}{\in} S_{ww} \{S_j\} \quad (132)$$

Wartości parametrów S_j są realizacją procesu stochastycznego $S_j(t, x, y, z,)$ opisanego w czasie i przestrzeni trójwymiarowej.

Stan warstwy wierzchniej można opisać również przy pomocy wektora stanu parametrów powierzchni (S_p) oraz wektora stanu parametrów podpowierzchniowych (S_{sp}).

$$S_{ww} = \langle S_p, S_{sp} \rangle \quad (133)$$

Stan powierzchni charakteryzuje zbiór wartości parametrów chropowatości S_j^1 :

$$S_p = \{S_j^1\}; S_p \subset S_{ww} \quad (134)$$

Wśród parametrów opisujących chropowatość warstwy wierzchniej można wyróżnić przykładowo parametry $R_a, R_q, R_{sk}, R_{ku}, D, R_k, R_{pk}, R_{vk}$. Wektor S_p będzie więc postaci:

$$S_p = \{R_a, R_q, R_{sk}, R_{ku}, D, R_k, R_{pk}, R_{vk}, \dots\} \quad (135)$$

Stan stref podpowierzchniowych charakteryzuje zbiór parametrów S_j^2 :

$$S_{sp} = \{S_j^2\}; S_{sp} \subset S_{ww} \quad (136)$$

Przykładowo mogą to być następujące parametry:

- σ - naprężenia własne w strefach podpowierzchniowych WW,
- H - mikro i makrotwardość materiału stref podpowierzchniowych WW,
- F - fragmentacja krystalitów materiału stref podpowierzchniowych,
- T - tekstura kryształów materiału stref podpowierzchniowych,
- C - własności chemiczne materiału stref podpowierzchniowych,
- E_p - stan energetyczny powierzchni,
- W_m - wady materiału stref podpowierzchniowych,
- h - grubość warstwy wierzchniej.

W związku z tym wektor stanu parametrów stref podpowierzchniowych można zapisać w sposób następujący:

$$S_{sp} = \{\sigma, H, F, T, C, E_p, W_m, h, \vec{G}\} \quad (137)$$

gdzie:

$$\vec{G} = \left\{ \frac{d\sigma}{dh}, \frac{dH}{dh}, \frac{dF}{dh}, \frac{dC}{dh}, \frac{dW}{dh} \right\}$$

$\vec{G}$ jest gradientem zmiany wartości parametrów stanu stref podpowierzchniowych względem głębokości h .

W związku z powyższym słuszne są relacje:

$$S_{ww} = S_p \cup S_{sp} \quad (138)$$

$$S_p \cap S_{sp} = \emptyset \quad (139)$$

7.3.3. Odpowiedzi obiektu.

Zbiór odpowiedzi obiektu można przedstawić jako:

$$W = \{W_t \cup W_{nt}\} \quad (140)$$

gdzie:

$W_t = \{w_1\}$ - oznacza zbiór odpowiedzi, których wartości zależą od czasu,

$W_{nt} = \{a_p\}$ - oznacza zbiór odpowiedzi, których wartości nie zależą od

czasu ($p = \overline{1, P}$).

przy czym:

$$W_t \cap W_{nt} = \emptyset \quad (\emptyset - \text{zbiór pusty})$$

W procesie zużycia elementami W_t są najczęściej składowe wektora parametrów S_{ww} , natomiast do W_{nt} zaliczane są parametry rdzenia R_r ;

$$w_k \in \{S_{ww}\} \subset W_t \quad (141)$$

W badaniach procesu zużycia istotne są odpowiedzi W_t . Rodzaj odpowiedzi zależy od sposobu określania zużycia elementów węzła TPC.

Za odpowiedź obiektu (węzeł TPC) można przyjąć zmianę wymiaru charakterystycznego, np.: luzu pomiędzy tuleją cylindrową a tłokiem w wybranym kierunku pomiarowym i na wybranej płaszczyźnie przekroju.

W ten sposób powstają zbiory:

$$\{v_s \in V \wedge c_k \in C\} \text{ oraz } \{w_l \in W\} \quad (142)$$

Następnym krokiem jest określenie przedziałów zmienności wartości czynników wymuszających i cech obiektu:

$$v_{s \min} \leq v_s \leq v_{s \max}; \quad c_{k \min} \leq c_k \leq c_{k \max} \quad (143)$$

Określenie tych wartości oraz przedziałów ich zmienności służy do opracowania planu eksperymentu. Postać planu jest uzależniona od przyjęcia typu zakładanej funkcji modelowej, ilości zmiennych, rozkładu dokładności z jaką model matematyczny ma opisywać zaobserwowane w badaniach odpowiedzi obiektu.

Dalej buduje się tzw macierz informacyjną planu eksperymentu [67], która w ogólnym ujęciu powiększona o kolumny odpowiedzi obiektu przedstawia się następująco:

$$\left[\begin{array}{l} v_{11}, v_{12}, v_{13}, \dots, v_{1S}, c_{11}, c_{12}, c_{13}, \dots, c_{1K}, w_{11}, w_{12}, w_{13}, \dots, w_{1L} \\ v_{21}, v_{22}, v_{23}, \dots, v_{2S}, c_{21}, c_{22}, c_{23}, \dots, c_{2K}, w_{21}, w_{22}, w_{23}, \dots, w_{2L} \\ v_{31}, v_{32}, v_{33}, \dots, v_{3S}, c_{31}, c_{32}, c_{33}, \dots, c_{3K}, w_{31}, w_{32}, w_{33}, \dots, w_{3L} \\ \vdots \\ v_{N1}, v_{N2}, v_{N3}, \dots, v_{NS}, c_{N1}, c_{N2}, c_{N3}, \dots, c_{NK}, w_{N1}, w_{N2}, w_{N3}, \dots, w_{NL} \end{array} \right] \quad (144)$$

gdzie:

n - liczba doświadczeń w planowanym eksperymencie,

s - liczba czynników wymuszających w planowanym eksperymencie,

k - liczba cech obiektu w planowanym eksperymencie,

1 - liczba odpowiedzi obiektu w planowanym eksperymencie.

Planowanie eksperymentu w identyfikacji procesu zużycia komplikuje konieczność budowania takich planów eksperymentów, w których występują

jednocześnie cechy kilku elementów biorących udział w procesie zużycia. Taka sytuacja ma miejsce w przypadku identyfikacji procesu zużycia węzła TPC. Kolumny macierzy planu eksperymentu powinny być wektorami cech elementów węzła TPC.

Istnieją dwa sposoby realizacji badań. W pierwszym z nich macierz planu składa się z kolumn czynników wymuszających i cech obiektu. Tego typu macierz powiększoną o odpowiedzi obiektu przedstawia (61). Drugi sposób realizacji badań polega na tym, że buduje się osobne macierze planu czynników wymuszających i cech obiektu. Każde doświadczenie, w którym zestaw cech obiektu jest odpowiednim wierszem planu cech, realizowane jest N - krotnie, przy czym N jest liczbą wierszy planu czynników wymuszających.

Konieczność uwzględnienia dużej ilości czynników wejściowych w planowaniu eksperymentu badania procesu zużycia węzła TPC narzuca stosowanie planów, przy realizacji których liczba doświadczeń jest najmniejsza. Odpowiednimi w tym celu są dwupoziomowe, czynnikowe plany sympleksowe.

Po przeprowadzeniu eksperymentu według takiego planu, czyli zrealizowaniu pierwszego etapu badań metody istnieje możliwość niesymetrycznego rozbudowania planu polegającego na wprowadzeniu punktów gwiazdnych (plan kompozycyjny) i realizacja drugiego etapu. Przy czym kierunek rozwinięcia planu zależy od wyników uzyskanych w pierwszym etapie.

Niesymetryczność rozbudowy planu polega, w tym wypadku, na wyborze czynników najistotniej wpływających na przebieg procesu zużycia węzła TPC. O istotności poszczególnych czynników można wnioskować na podstawie wyników uzyskanych w pierwszym etapie badań.

7.4. Przykład zastosowania metody prowadzenia badań procesu zużycia węzła TPC - badania symulacyjne.

Założono, że w procesie zużycia istotne są następujące parametry węzła TPC:

- parametry tulei

- v_1 - średnia kwadratowa wysokość nierówności profilu powierzchni R_q ,
- v_2 - skośność profilu R_{sk} ,
- v_3 - średnia wysokość nierówności profilu powierzchni R_a ,

v_4 - rodzaj materiału warstwy wierzchniej tulei,
 v_5 - kurtoza profilu R_{ku} ,

- parametry pierścieni

v_6 - charakter rozkładu nacisków,
 v_7 - materiał,
 v_8 - wysokość pierścienia,

- parametry tłoka

v_9 - chropowatość powierzchni bocznej,

- rodzaj filtrów powietrza - v_{10} ,

- rodzaj oleju smarującego - v_{11} .

Założono dalej, że w każdym doświadczeniu eksperymentu czynniki wymuszające przyjmują wartości na dwóch poziomach.

Liczba czynników oraz założona dwupoziomowość ich wartości w eksperymencie są danymi wejściowymi do opracowania macierzy planu eksperymentu.

Jako odpowiedzi obiektu przyjęto:

- Średni przebieg do osiągnięcia przez silnik przyjętego procentowo spadku mocy - $w_1 = L_0$,

- prawdopodobieństwo poprawnej pracy w przedziale czasu od 0 do t_0 ; w

tym przypadku rozumiano jako $\hat{R}(t_0) = \frac{N(t_0)}{N(0)}$, gdzie: $N(t_0)$ - liczba

silników o przebiegu L_0 dłuższym od L_{0sr} , $N(0)$ - ogólna liczba silników (o założonej realizacji cech) - $w_2 = \hat{R}(t_0)$,

- średnia wartość zużycia tulei cylindrowych na wysokości GMP pierwszego pierścienia uszczelniającego w przekroju prostokątnym do osi wału korbowego - w_3 ; μm ,

- średnie zmniejszenie grubości promieniowej pierścienia przy zamku - w_4 ; μm ,

- zmiana średnicy progu ogniowego tłoka nad górną półką pierścieni - w_5 ; μm .

Przed przystąpieniem do ułożenia planu eksperymentu dokonano

standaryzacji czynników wymuszających (zmienne standaryzowane oznaczono x_s ; $s = 1, \dots, 11$). W wyniku przeprowadzenia tej operacji początek nowego układu współrzędnych przenosi się do punktu centralnego, w którego otoczeniu wykonuje się eksperyment. Operacja ta pozwala także na uniezależnienie się od układu jednostek miar, w których zapisywane są wartości czynników wymuszających.

W celu wyznaczenia relacji standaryzacji czynników wymuszających należy wyznaczyć wartości średnie ($\bar{x}_s$) oraz błąd graniczny pomiaru wartości średniej (Δx_s) [23].

$$\bar{x}_s = \frac{x_{smin} + x_{smax}}{2} \quad (145)$$

$$\Delta x_s = \frac{x_{smax} - x_{smin}}{2\alpha} \quad (146)$$

Relacja standaryzacji czynników wymuszających w przedziale $(-\alpha, +\alpha)$ [23] przedstawia się następująco:

$$\hat{x}_s = \frac{x_s - \bar{x}_s}{\Delta x_s} = \frac{2\alpha(x_s - \bar{x}_s)}{x_{smax} - x_{smin}} \quad (147)$$

W przypadku planowania eksperymentu dwupoziomowego czynniki wymuszające przyjmują po standaryzacji jedynie dwie wartości; +1 i -1 oraz, co wynika z równania (147) są bezwymiarowe.

Z uwagi na ilość czynników wymuszających oraz dwupoziomowość ich wartości przyjęto sympleksowy, czynnikowy plan pierwszego rzędu A - optymalny. Macierz informacyjna tego planu wraz z hipotetycznymi wartościami odpowiedzi obiektu przedstawiona została w tabeli 11.

Tabela 11.

Macierz informacyjna planu eksperymentu wraz z hipotetycznymi odpowiedziami obiektu.

Nr dośw.	v ₁	v ₂	v ₃	v ₄	v ₅	v ₆	v ₇	v ₈	v ₉	v ₁₀	v ₁₁	w ₁ kmx x10 ⁵	w ₂ %	w ₃ μm	w ₄ μm	w ₅ μm
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	x ₉	x ₁₀	x ₁₁					
1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	3.1	61	25.6	61	23
2	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	3.2	82	28.3	28	13
3	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	2.8	67	32.7	25	17
4	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	2.8	70	32.7	25	17
5	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	2.5	75	35.2	20	8
6	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	2.0	79	37.2	60	14
7	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	3.5	91	24.0	53	23
8	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	4.0	95	20.6	1	50
9	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	3.0	90	21.8	27	19
10	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	2.5	76	40.4	33	24
11	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	3.3	51	21.2	19	39
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	2.9	85	28.3	57	14

— macierz planu

Wartości wielkości wejściowych oraz odpowiedzi obiektu pozwalają na przyjęcie równań modelowych w postaci:

$$w_l = \exp(b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_s x_s) \quad l = 1, \overline{L} \quad (148)$$

Stosując analizę regresji można otrzymać wielomiany aproksymujące wartości odpowiedzi obiektu. Dla danych zawartych w tabeli 1 są one postaci:

$$w_1 = \exp(1.073 - 0.098x_1 - 0.032x_2 + 0.014x_3 + 0.687x_4 - 0.066x_5 - 0.042x_6 + 0.059x_7 + 0.038x_8 + 0.026x_9 - 0.047x_{10} - 0.006x_{11}) \quad (149)$$

$$w_2 = \exp(4.327 - 0.03x_1 - 0.037x_2 + 0.006x_3 + 0.096x_4 + 0.052x_5 - 0.012x_6 - 0.035x_7 + 0.015x_8 - 0.017x_9 - 0.048x_{10} - 0.108x_{11}) \quad (150)$$

$$w_3 = \exp(3.343 + 0.148x_1 + 0.030x_2 - 0.004x_3 - 0.064x_4 + 0.068x_5 + 0.069x_6 - 0.009x_7 - 0.049x_8 - 0.116x_9 - 0.005x_{10} + 0.006x_{11}) \quad (151)$$

$$w_4 = \exp(3.227 + 0.315x_1 + 0.199x_2 - 0.125x_3 - 0.425x_4 - 0.377x_5 + 0.277x_6 - 0.307x_7 + 0.264x_8 - 0.344x_9 - 0.525x_{10} + 0.071x_{11}) \quad (152)$$

$$w_5 = \exp(2.963 - 0.255x_1 - 0.144x_2 + 0.118x_3 - 0.052x_4 - 0.032x_5 + 0.102x_6 + 0.221x_7 + 0.180x_8 + 0.002x_9 + 0.201x_{10} - 0.201x_{11}) \quad (153)$$

Przedstawiony układ równań stanowi model obiektu. Znajomość modelu pozwala na optymalizację procesu zużycia. Na przykład silniki z węzłami TPC o cechach:

W badaniach pierwszego etapu przyjęto dwupoziomowość czynników wymuszających, co pociąga założenie o tym, że odpowiedzi obiektu są w odniesieniu do każdego z nich liniowe. W ogólnym przypadku tak być nie musi, więc potrzeba stać się rozwój badań tak, aby można było opracować równania modelowe wyższych rzędów ze względu na wybrane czynniki wymuszające. Przy dużej liczbie czynników wymuszających eksperyment rozbudowuje się niesymetrycznie, względem czynników najistotniej wpływających na przebieg procesu.

Istotność czynników wymuszających można zbadać w przypadku ich dwupoziomowości np. metodą bilansu losowego.

Dokonuje się wyboru najbardziej miarodajnej odpowiedzi obiektu. W przypadku zużycia węzła TPC będzie to wartość zużycia tulei cylindrowych w GMP pierwszego pierścienia uszczelniającego (w_3).

Pierwszym etapem opracowania wyników badań, w metodzie bilansu losowego, jest analiza rozrzutu wyników doświadczeń względem poszczególnych czynników branych na dolnym (-1) i na górnym (+1) poziomie wartości. Wyniki przeprowadzonej w ten sposób analizy zawarte są w tabeli 12.

W kolumnie pierwszej tabeli podano numer doświadczenia, w kolumnie drugiej zestawiono wyniki doświadczeń. Wartości poziomów czynnika v_3 w poszczególnych doświadczeniach zawiera kolumna trzecia. w kolumnach czwartej i piątej podano wyniki doświadczeń przyporządkowane odpowiednim poziomom. Podano również wartości średnie arytmetyczne wyników w poszczególnych kolumnach (-1) i (+1). Wartością bezwzględną różnicy średnich dla poziomów czynnika (+1) i (-1) jest mediana.

Tabela 12.

Sposób przyporządkowania danego wyniku doświadczenia poziomowi (-1) lub (+1) dla czynnika x_3

numer doświadczenia	wyniki doświadczenia	wartości poziomów czynnika x_3	wartości wyników doświadczeń na poziomach	
			-1	+1
1	25.6	+1	28.3	25.6
2	28.3	-1		32.7
3	32.7	+1		
4	32.7	+1		
5	35.2	-1	35.2	37.5
6	37.5	+1		
7	24.0	+1		
8	20.6	+1		
9	21.8	-1	21.8	24.0
10	40.4	-1		
11	21.2	-1		
12	28.3	-1		
wartość średnia			29.2	28.9
mediana			0.3	

W tabeli 13 podano wyniki zużycia tulei przyporządkowane poszczególnym czynnikom wg sposobu pokazanego w tabeli 12.

Porównując mediany można wyodrębnić efekty liniowe oraz uszeregować czynniki wg malejących wpływów średnich lub wartości (rys. 36).

Tabela 13.

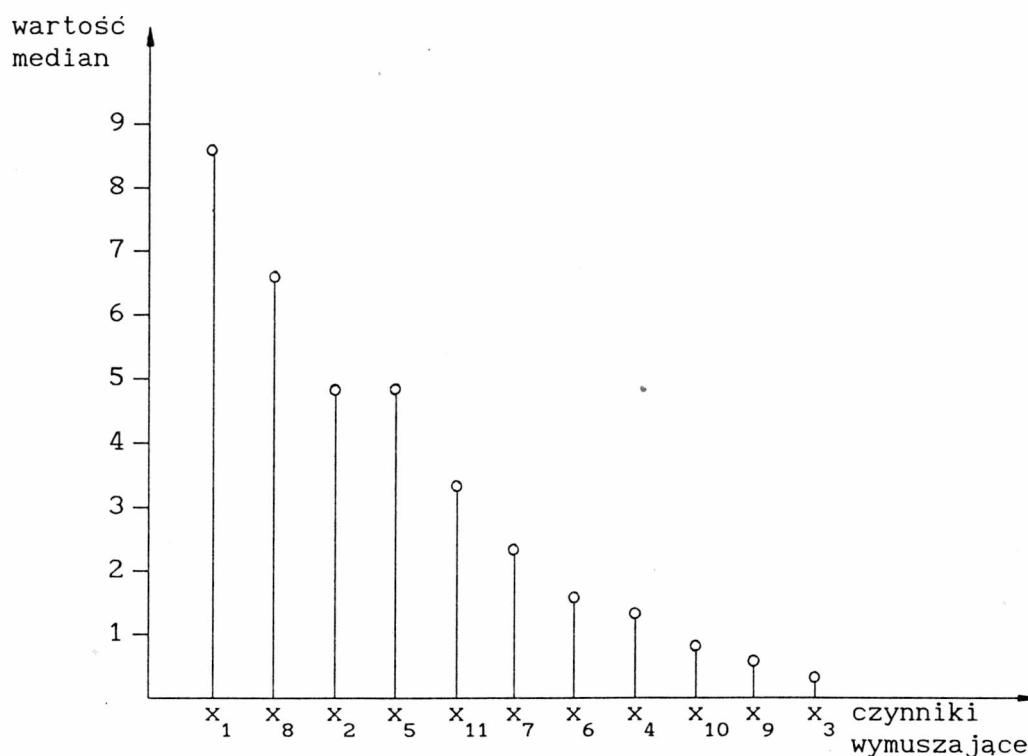
Analiza rozrzutu wyników zużycia tulei względem poszczególnych czynników branych na górnym (+1) i dolnym (-1) poziomie wartości; wartości średnie oraz mediany.

poziom wartości	czynniki										
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
(-1)	24.8	25.0	29.2	24.7	26.7	28.5	30.2	32.2	29.2	28.7	29.8
(+1)	33.2	29.8	28.9	23.5	31.3	29.6	27.8	25.8	28.9	29.3	26.5
wartość mediany	8.45	4.74	0.30	1.23	4.63	1.60	2.33	6.43	0.40	0.63	3.27

Poza określeniem istotności poszczególnych czynników metoda porównania median stosuje się w tym celu również metodę budowania tzw. tablic z trzema wejściami [68]. Metoda bilansu losowego umożliwia również ocenę wpływu kombinacji liniowych czynników typu $x_i x_j$ dla i różnego od j .

Przeprowadzony na przykładzie tok postępowania pozwolił na ustalenie istotności wpływu na wartość zużycia w GMP pierwszego pierścienia tulei cylindrowych poszczególnych czynników wejściowych. W przedstawionym przykładzie najistotniejszy wpływ wykazały w kolejności czynniki:

$$x_1; x_8; x_2; x_5; x_{11}; x_7; x_6; x_4; x_{10}; x_9; x_3 \quad (154)$$



Rys. 36. Wartość wpływu na zużycie tulei cylindrowej w GMP pierwszego pierścienia badanych czynników liniowych według malejących median.

Dalsze postępowanie w prezentowanej metodzie (etap drugi) polega na niesymetrycznym rozbudowaniu planu eksperymentu polegającym na ograniczeniu ilości czynników wejściowych i rozbudowie planu o punkty gwiazdne oraz punkty centralne [41]. Powstaje w ten sposób plan eksperymentu kompozycyjny, który można zawęzić do jednego z wielu planów optymalnych lub quasi optymalnych, randomizowanych, poliselekcyjnych.

Tabela 14.

Macierz informacyjna planu eksperymentu Hartley'a dla $i = 4$ zmiennych wejściowych.

n	x_1	x_2	x_3	x_4	y
1	-1	-1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	-1	-1	y_2
3	-1	+1	-1	-1	y_3
4	+1	+1	-1	-1	y_4
5	-1	-1	+1	-1	y_5
6	+1	-1	+1	-1	y_6
7	-1	+1	+1	-1	y_7
8	+1	+1	+1	-1	y_8
9	2	0	0	0	y_9
10	2	0	0	0	y_{10}
11	0	2	0	0	y_{11}
12	0	2	0	0	y_{12}
13	0	0	2	0	y_{13}
14	0	0	2	0	y_{14}
15	0	0	0	2	y_{15}
16	0	0	0	2	y_{16}
15	0	0	0	0	y_{17}

W prezentowanym przykładzie można ograniczyć liczbę czynników wejściowych do czterech x_1, x_2, x_3, x_4 oraz rozbudować plan do np. planu Hartley'a na hiperkuli [23]. Macierz informacyjna takiego planu jest przedstawiona w tabeli 14. Dla $i = 4$ zmiennych wejściowych długość ramienia gwiazdnego wynosi $\alpha_g = \sqrt{i} = 2$, liczba doświadczeń w jądrze planu $n_k = 2^{i-p} = 8$, liczba doświadczeń w punktach gwiazdnych planu $n_\alpha = 8$, liczba doświadczeń w punkcie centralnym $n_0 = 1$, a całkowita liczba punktów planu wynosi $n = 2^{i-p} + 2i + n_0 = 15$.

Dalsze postępowanie polega na przeprowadzeniu eksperymentu według

zaprezentowanego planu poddając planowaniu wybrane wcześniej czynniki x_1, x_8, x_2, x_5 . Otrzymane odpowiedzi obiektu pozwalają na zbudowanie modelu matematycznego procesu zużycia postaci np:

$$\hat{z} = \exp(b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_8 + b_3 x_2 + b_4 x_5 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_8^2 + b_{33} x_2^2 + b_{44} x_5^2 + b_{12} x_1 x_8 + b_{13} x_1 x_2 + b_{14} x_1 x_5 + b_{23} x_8 x_2 + b_{24} x_8 x_5 + b_{34} x_2 x_5) \quad (155)$$

Nieodzownym jest określenie współczynnika korelacji wielowymiarowej pomiędzy odpowiedziami modelu i odpowiedziami obiektu.

8. BADANIA PROCESU ZUŻYCIA WARSTWY WIERZCHNIEJ TULEI CYLINDROWYCH PROWADZONE WG PLANOWANEGO EKSPERYMENTU.

Proponowana metoda prowadzenia badań trwałościowych węzła TPC polega na rozbudowie w drugim etapie badań planu czynnikowego opartego na czynnikach wymuszających mających istotny wpływ na proces zużycia do planu kompozycyjnego. Polega to na uzupełnieniu planowania dwupoziomowego symetrycznymi doświadczeniami gwiezdnymi oraz doświadczeniami centralnymi.

8.1. Wybór planu eksperymentu.

Sformułowano [23] zalecenia dotyczące stosowania planowania eksperymentu w badaniach warstwy wierzchniej i jej procesów zużycia. Są one następujące:

- należy stosować plany zdeterminowane umożliwiające wyznaczenie funkcji aproksymującej, łącznie z oceną niedokładności. Analiza korelacji powinna być analizą kwantytatywną (test t-Studenta),
- badania eliminacyjne wielkości nieistotnych należy stosować jedynie wtedy, gdy w odniesieniu do tych wielkości istnieje merytoryczne (fizyczne, technologiczne itp.) uzasadnienie ich możliwej nieistotności; stosując plany randomizowane uwzględniające jedynie wielkości prawdopodobnie nieistotne z przyczyn merytorycznych, uzyskuje się doświadczalną weryfikację wniosków wpływających z analizy teoretycznej,
- plany optymalizacyjne zaleca się stosować w przypadku badań, których celem jest wyłącznie określenie stanów optymalnych przeznaczonych do praktycznego wykorzystania przemysłowego; nie przewiduje się przy tym, z różnych pozametodycznych względów, obszernej analizy teoretycznej badanej problematyki.

Zgodnie z podanymi powyżej zaleceniami wyboru planu doświadczeń w badaniach warstwy wierzchniej zdecydowano się na wybranie planu Hartley'a.

Plany Hartley'a są planami poliselekcyjnymi specjalnymi (quasi D - optymalnymi), można je podzielić na plany na hipersześcianie oraz na

hiperkuli. Plany Hartley'a na hipersześcianie (hS) ograniczają liczbę wartości czynników wymuszających do $n_{\max} = 3$ ($\hat{x} = -1; 0, +1; \alpha = 1$). Plany Hartley'a na hiperkuli (hK) pozwalają na stosowanie maksymalnie $n_{\max} = 5$ wartości czynników wymuszających ($\hat{x} = 0; \pm 1; \pm \alpha$). W skład planu Hartley'a wchodzi: jądro planu $n_k = 2^{i-p}$, punkty gwiazdne $n_\alpha = 2i$ oraz centrum planu, ograniczone zwykle do $n_0 = 1$. Na rys. 37 zamieszczono normowane wartości czynników wymuszających w planie Hartley'a dla i-tej liczby wielkości wejściowych.

u	$\check{x}_1$	$\check{x}_2, \dots$	$\check{x}_i$	
1	± 1	$\pm 1, \dots$	± 1	} $n_k = 2^{i-p}$
2	± 1	$\pm 1, \dots$	± 1	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
n_k	± 1	± 1	± 1	
n_k+1	$-\alpha$	0	0	} $n_\alpha = 2i$
n_k+2	$+\alpha$	0	0	
n_k+3	0	$-\alpha$	0	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
n_k+n_α	0	0	$+\alpha$	} $n_0 = 1$
$n=n_k+n_\alpha+1$	0	0	0	

Rys. 37. Plan eksperymentu Hartley'a [23].

Ostatecznie zdecydowano się na przyjęcie planu Hartley'a na hiperkuli. Umożliwia on przeprowadzenie doświadczeń na pięciu poziomach, zagęszczając zakresy zmienności czynników wymuszających.

8.2. Normowanie czynników wymuszających planu eksperymentu.

Na podstawie pomiarów profilometrycznych określam zakresy zmienności czynników wymuszających;

$$\left. \begin{aligned}
 x_1 &= R_q = 0.68 \div 1.78 \text{ } \mu\text{m}, \\
 x_2 &= R_{sk} = -1.8 \div -0.1, \\
 x_3 &= R_{ku} = 2.1 \div 9.3.
 \end{aligned} \right\} \quad (156)$$

Plan Hartley'a na hiperkuli dla $i = 3$ czynników wymuszających

charakteryzują następujące parametry:

$\alpha = 1.732$	- ramię planu
$\hat{x}: -1.732, -1, 0, +1, +1.732$	- wartości wielkości wejściowych,
$I = \hat{x}_1 \hat{x}_2 \hat{x}_3$	- kontrast planu,
$n_k = 2^{3-1} = 2^2 = 4$	- liczba punktów jądra planu,
$n_\alpha = 6$	- liczba punktów gwiazdnych,
$n_0 = 1$	- liczba punktów centrum planu,
$n = 11$	- sumaryczna liczba punktów planu.

W celu wyznaczenia relacji normowania zmiennych wejściowych dla $\alpha = |1.732|$ należy wyznaczyć wartości średnie ($\bar{x}_k$) oraz błąd graniczny pomiaru wartości średniej (Δx_k) [23].

$$\bar{x}_k = \frac{x_{kmin} + x_{kmax}}{2} \quad (157)$$

$$\Delta x_k = \frac{x_{kmax} - x_{kmin}}{2\alpha} \quad (158)$$

Relacja normowania wartości wielkości wejściowych w przedziale $(-\alpha, +\alpha)$ [23] przedstawia się następująco:

$$\hat{x}_k = \frac{x_k - \bar{x}_k}{\Delta x_k} = \frac{2\alpha(x_k - \bar{x}_k)}{x_{kmax} - x_{kmin}} \quad (159)$$

Na jej podstawie obliczam relację odwrotną:

$$x_k = \bar{x}_k + \hat{x}_k \Delta x_k = \bar{x}_k + \frac{\hat{x}_k}{\alpha} (x_{kmax} - \bar{x}_k) \quad (160)$$

Wykorzystując powyższe relacje normowania obliczam wartości $x_k: -\alpha, -1, 0, 1, +\alpha$ dla $\alpha = 1.732$:

$$\left. \begin{aligned} x_1(-\alpha) &= R_q(-1.732) = 0.68; \\ x_1(-1) &= R_q(-1) = 0.91; \\ x_1(0) &= R_q(0) = 1.23; \\ x_1(1) &= R_q(1) = 1.55; \\ x_1(+\alpha) &= R_q(1.732) = 1.78; \end{aligned} \right\} \quad (161)$$

$$\begin{aligned}
 x_2(-\alpha) &= R_{sk}(-1.732) = -1.79; \\
 x_2(-1) &= R_{sk}(-1) = -1.44; \\
 x_2(0) &= R_{sk}(0) = -0.95; \\
 x_2(1) &= R_{sk}(1) = -0.46; \\
 x_2(+\alpha) &= R_{sk}(1.732) = -0.10;
 \end{aligned}
 \tag{162}$$

$$\begin{aligned}
 x_3(-\alpha) &= R_{ku}(-1.732) = 2.1; \\
 x_3(-1) &= R_{ku}(-1) = 3.6; \\
 x_3(0) &= R_{ku}(0) = 5.7; \\
 x_3(1) &= R_{ku}(1) = 7.8; \\
 x_3(+\alpha) &= R_{ku}(1.732) = 9.3;
 \end{aligned}
 \tag{163}$$

oraz:

$$\hat{R}_q = \frac{3.464(R_q - 1.23)}{1.78 - 0.68} = 3.149R_q - 3.873
 \tag{164}$$

$$\hat{R}_{sk} = \frac{3.464(R_{sk} + 0.95)}{-0.1 + 1.8} = 2.038R_{sk} + 1.936
 \tag{165}$$

$$\hat{R}_{ku} = \frac{3.464(R_{ku} - 5.7)}{9.3 - 2.1} = 0.48R_{ku} - 2.74
 \tag{166}$$

8.3. Postać wielomianu aproksymującego wartość zużycia.

Przyjmuję funkcję aproksymującą wartość zużycia tulei w postaci eksponentyjnej:

$$\hat{z} = \exp(b_0 + \sum_{k=1}^i b_k \hat{x}_k + \sum_{k=1}^i b_{kk} \hat{x}_k^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ q < k}}^i b_{qk} \hat{x}_q \hat{x}_k)
 \tag{167}$$

Zatem:

$$\begin{aligned}
 \hat{z} = \exp(b_0 + b_1 \hat{x}_1 + b_2 \hat{x}_2 + b_3 \hat{x}_3 + b_{11} \hat{x}_1^2 + b_{22} \hat{x}_2^2 + b_{33} \hat{x}_3^2 + b_{12} \hat{x}_1 \hat{x}_2 + \\
 + b_{13} \hat{x}_1 \hat{x}_3 + b_{23} \hat{x}_2 \hat{x}_3)
 \end{aligned}
 \tag{168}$$

8.4. Macierz informacyjna planu eksperymentu.

Utworzono plan eksperymentu w postaci przedstawionej w tabeli 15.

Tabela 15.

Macierz informacyjna planu eksperymentu Hartley'a na zmiennych standaryzowanych i niestandaryzowanych; $\alpha = 1.732$.

u	$\hat{x}$			x		
	$\hat{x}_1$	$\hat{x}_2$	$\hat{x}_3$	$x_1=R_q$	$x_2=R_{sk}$	$x_3=R_{ku}$
1	-1	-1	+1	0.91	-1.44	7.8
2	+1	-1	-1	1.55	-1.44	3.6
3	-1	+1	-1	0.91	-0.46	3.6
4	+1	+1	+1	1.55	-0.46	7.8
5	$-\alpha$	0	0	0.68	-0.95	5.7
6	$+\alpha$	0	0	1.78	-0.95	5.7
7	0	$-\alpha$	0	1.23	-1.79	5.7
8	0	$+\alpha$	0	1.23	-0.10	5.7
9	0	0	$-\alpha$	1.23	-0.95	2.1
10	0	0	$+\alpha$	1.23	-0.95	9.3
11	0	0	0	1.23	-0.95	5.7

Plan ten wykorzystano w badaniach eksploatacyjnych.

8.5. Opracowanie wyników badań przeprowadzonych w ramach eksperymentu planowanego.

W tabeli 16 przedstawiam macierz informacyjną planu eksperymentu wzbogaconą o kolumny odpowiedzi obiektu, czyli wartości zużycia tulei cylindrowych po przebiegu 50 oraz 100 tys. km, zmierzone po badaniach eksploatacyjnych prowadzonych równolegle z badaniami w eksploatacji naturalnej w ramach kontrolowanego eksperymentu biernego. Wartości czynników wymuszających planu wydzielono spośród wartości czynników wymuszających kontrolowanego eksperymentu biernego.

Tabela 16.

Macierz informacyjna planu eksperymentu wzbogacona o kolumny odpowiedzi obiektu.

	macierz informacyjna planu eksperymentu			kolumny odpowiedzi obiektu	
u	$R_{\mu q}$	R_{sk}	R_{ku}	z_{50} μm	z_{100} μm
1	0.92	-1.40	7.6	10	15
2	1.49	-1.40	3.5	18	29
3	0.89	-0.50	3.5	10	28
4	1.50	-0.50	7.5	8	14
5	0.66	-1.00	5.7	26	42
6	1.78	-0.90	5.6	30	32
7	1.24	-1.80	5.8	6	11
8	1.26	-0.10	5.6	8	15
9	1.25	-1.00	2.1	18	20
10	1.20	-1.00	9.2	17	28
11	1.20	-1.00	5.6	5	8

Podobnie jak wyniki pomiarów wartości zużycia tulei cylindrowych zmierzone po badaniach w kontrolowanym eksperymencie biernym, również wyniki badań eksploatacyjnych zużycia przeprowadzonych wg eksperymentu planowanego poddałem analizie regresji w pakiecie zintegrowanym STATGRAPHIX.

Analiza regresji została przeprowadzona zgodnie z postępowaniem omówionym w punkcie 7.2.3, łącznie z obliczeniem współczynników korelacji wielowymiarowej R^2 , po przebiegu 50 i 100 tys. km.

Otrzymane postacie wielomianu aproksymującego oraz wartości współczynników korelacji R^2 są następujące:

Po przebiegu 50 tys. km:

$$\hat{z}_{50} = \exp(6.403 - 7.611R_q + 4.572R_q^2 + 0.061R_{ku}^2 - 0.585R_q R_{ku}) \quad (169)$$

$$R^2 = 0.8951 \quad (170)$$

Otrzymany model różni się od założonego z uwagi na odrzucenie

członów, których wpływ pogarszał istotność funkcji regresji (test F-Snedecora).

Po przebiegu 100 tys. km:

$$\hat{z}_{100} = \exp(13.744 - 13.929R_q + 4.761R_{sk} - 0.282R_{ku} + 5.077R_q^2 + 0.694R_{sk}^2 + 0.079R_{ku}^2 - 3.296R_q R_{sk} - 0.328R_q R_{ku} + 0.152R_{sk} R_{ku}) \quad (171)$$

$$R^2 = 0.9999 \quad (172)$$

W tabeli 17 zestawiono wartości wyjść obiektu y oraz wyjść modeli $\hat{y}$ otrzymanych po przebiegu 50 i 100 tys. km oraz błąd bezwzględny dopasowania modelu liczony według wzoru (114).

Tabela 17.

Wartości wyjścia obiektu i modelu oraz błąd bezwzględny pomiędzy tymi wartościami.

u	z_{50} μm	$\hat{z}_{50}$ μm	Δz_{50} %	z_{100} μm	$\hat{z}_{100}$ μm	Δz_{100} %
1	10	14.954	49.55	15	14.869	0.87
2	18	18.315	1.75	29	28.792	0.71
3	10	8.805	11.95	28	27.823	0.63
4	8	8.857	4.46	14	13.898	0.73
5	26	23.414	9.94	42	42.207	0.49
6	30	30.597	1.99	32	32.104	0.33
7	6	6.293	4.89	11	11.047	0.43
8	8	6.340	20.00	15	15.059	0.39
9	18	17.508	2.73	20	20.085	0.42
10	17	12.933	23.92	28	28.136	0.48
11	5	6.264	25.28	8	8.033	0.41

z_{50} - zużycie tulei cylindrowych po przebiegu 50 tys. km,

z_{100} - zużycie tulei cylindrowych po przebiegu 100 tys. km.

Wartości współczynnika korelacji wielowymiarowej R^2 oraz średniego bezwzględnego błędu pomiędzy wartościami wyjść obiektu a wartościami wyjść modelu wynoszącymi po przebiegu 50 tys. km 14.2245% oraz po przebiegu 100 tys. km 0.5379% wskazują na bardzo dobre dopasowanie

modelu do obiektu badań.

Mając postać funkcji aproksymującej pozostaje wyznaczyć wartości optymalne parametrów chropowatości, rozumiane jako te, przy których zużycie byłoby minimalne.

W związku z tym stosuję analityczną metodę poszukiwania minimum funkcji wielu zmiennych, drogą liczenia pochodnych cząstkowych, przyrównania ich do zera i obliczenia wartości zmiennych odpowiadających ekstremum funkcji.

Jako pierwsze obliczam pochodne cząstkowe wielomianu aproksymującego wartość zużycia po przebiegu 50 tys. km (169) i na jego podstawie wyznaczam wartości optymalne.

Wyrażenie $\exp(.1.)$ we wzorach (173) oznacza wielomian aproksymujący (169).

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta z_{50}}{\delta R_q} &= (-7.611407 + 9.143092R_q - 0.585208R_{ku})\exp(.1.) \\ \frac{\delta z_{50}}{\delta R_{sk}} &- \text{nie istnieje} \\ \frac{\delta z_{50}}{\delta R_{ku}} &= (0.122112R_{ku} - 0.585208R_q)\exp(.1.) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (173)$$

Pochodna cząstkowa po wielkości R_{sk} nie istnieje. W związku z tym otrzymuję układ dwóch równań z dwiema niewiadomymi:

$$\begin{cases} -7.611407 + 9.143092R_q - 0.585208R_{ku} = 0 \\ 0.122112R_{ku} - 0.585208R_q = 0 \end{cases} \quad (174)$$

Rozwiązaniem układu równań (174) są następujące wartości wielkości wejściowych:

$$\begin{aligned} R_q &= 1.20 \mu\text{m} \\ R_{ku} &= 5.75 \end{aligned} \quad (175)$$

Na podstawie analitycznych rozważań wielomianu aproksymującego wartość zużycia po przebiegu 50 tys. km nie można wyznaczyć wartości optymalnej wielkości R_{sk} .

Pochodne cząstkowe wielomianu aproksymującego wartość zużycia po przebiegu 100 tys. km (171) są następujące:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta z_{100}}{\delta R_q} &= (-13.9295 + 10.15383R_q - 3.29578R_{sk} - 0.327815R_{ku})\exp(.2.) \\ \frac{\delta z_{100}}{\delta R_{sk}} &= (4.76146 + 1.387488R_{sk} - 3.295784R_q + 0.152012R_{ku})\exp(.2.) \\ \frac{\delta z_{100}}{\delta R_{ku}} &= (-0.28210 + 0.15887R_{ku} - 0.32781R_q + 0.152015R_{sk})\exp(.2.) \end{aligned} \right\} (176)$$

Wyrażenie $\exp(.2.)$ we wzorach (176) oznacza wielomian aproksymujący wartość zużycia po przebiegu 100 tys. km (171).

Po przyrównaniu pochodnych cząstkowych do zera oraz przekształceniach matematycznych otrzymuję układ trzech równań z trzema niewiadomymi:

$$\left\{ \begin{aligned} -13.9295 + 10.15383R_q - 3.29578R_{sk} - 0.327815R_{ku} &= 0 \\ 4.76146 + 1.387488R_{sk} - 3.295784R_q + 0.152012R_{ku} &= 0 \\ -0.28210 + 0.15887R_{ku} - 0.32781R_q + 0.152015R_{sk} &= 0 \end{aligned} \right. (177)$$

Rozwiązaniem tego układu równań są:

$$\begin{aligned} R_q &= 1.00 \mu m \\ R_{sk} &= -1.76 \\ R_{ku} &= 6.29 \end{aligned} (178)$$

Wartości wielkości wejściowych otrzymane na podstawie poszukiwania minimum wielomianów aproksymujących wartość zużycia po przebiegu 50 oraz 100 tys. km nie różnią się w sposób znaczący, oczywiście wielomian

aproksymujący wartość zużycia po przebiegu 50 tys. km nie zawiera zmiennej R_{sk} , w związku z tym na jego podstawie nie jest możliwe jego określenie. Jako ostateczne przyjmuje wartości zmiennych wejściowych otrzymane po przebiegu 100 tys. km (178). Minimalne aproksymowane wartości zużycia obliczone po podstawieniu (178) do (169) i (171) wynoszą:

$$\begin{aligned}\hat{z}_{50} &= 6.149 \mu\text{m} \\ \hat{z}_{100} &= 8.038 \mu\text{m}\end{aligned}$$

Otrzymane wartości pochodzą z dwóch różnych wielomianów aproksymujących i jako takie nie stanowią dwóch punktów funkcji aproksymującej wartość zużycia tulei cylindrowej w czasie. Otrzymane wielomiany są aproksymacją wartości zużycia po przebiegu 50 tys. km oraz po przebiegu 100 tys. km. Czyli na podstawie wielomianu (169) można przewidywać wartość zużycia po 50 tys. km i tylko w tym punkcie przebiegu. Podobnie na podstawie wielomianu (171) można przewidywać wartość zużycia po przebiegu 100 tys. km i tylko w tym punkcie przebiegu.

Podsumowując, otrzymane wielomiany aproksymujące wartość zużycia tulei cylindrowej nie opisują kinetyki procesu zużycia, lecz wyrokuje o wartości zużycia w konkretnym punkcie czasu.

8.6. Zastosowanie wielomianów aproksymujących wartości zużycia tulei cylindrowych, otrzymanych na podstawie eksperymentu planowanego do badań procesu zużycia tulei cylindrowych prowadzonych w ramach kontrolowanego eksperymentu biernego.

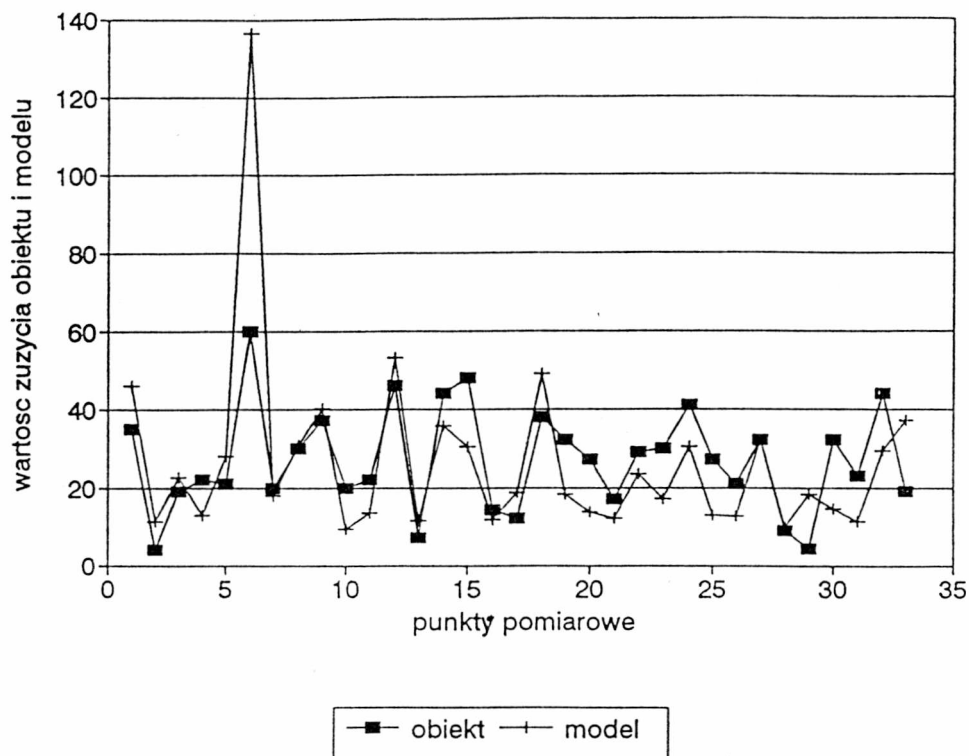
W celu porównania wartości wyjść obiektu oraz wyjść modelu zostały one zestawione w tabeli 18. Wyjścia obiektu to wartości zużycia otrzymane w wyniku prowadzenia badań wg kontrolowanego eksperymentu biernego. Wyjścia modelu są to wartości zużycia obliczone na podstawie wielomianów aproksymujących (169), (171) otrzymanych w wyniku przeprowadzenia eksperymentu planowanego.

Tabela 18.

Wyjścia modelu i obiektu badań po przebiegu 50 i 100 tys. km oraz wartości błędu bezwzględnego pomiędzy nimi.

Lp.	z_{50} μm	$\hat{z}_{50}$ μm	Δz_{50} %	z_{100} μm	$\hat{z}_{100}$ μm	Δz_{100} %
1	13	12.567	3.33	22	12.794	41.84
2	10	10.148	1.48	21	27.937	33.03
3	13	12.643	2.75	23	11.289	50.91
4	15	8.937	40.42	27	13.853	48.69
5	11	90.348	721.35	19	37.070	95.11
6	11	6.551	40.44	21	12.609	39.95
7	6	9.969	66.15	12	18.757	56.31
8	11	10.109	8.09	17	12.128	28.66
9	6	6.757	12.62	9	9.812	9.01
10	4	13.145	228.62	7	11.613	65.90
11	17	10.733	36.86	32	18.070	43.53
12	30	46.475	54.92	60	136.433	127.39
13	20	14.126	29.37	38	49.133	29.29
14	11	13.019	18.36	22	13.583	38.26
15	10	12.659	26.59	29	23.334	19.53
16	12	6.561	45.33	27	13.050	51.67
17	22	8.352	62.04	30	16.962	43.46
18	10	7.646	23.55	20	9.421	52.89
19	6	13.891	131.52	30	30.609	2.03
20	3	14.208	373.59	4	11.311	182.78
21	2	19.759	723.27	4	18.244	324.28
22	29	14.106	51.36	35	45.846	30.99
23	37	38.856	5.02	44	29.185	33.67
24	35	15.743	55.02	48	30.491	36.48
25	17	37.008	117.69	19	22.630	19.11
26	21	31.592	50.44	37	40.023	8.17
27	16	18.278	14.24	20	17.868	10.66
28	18	11.186	37.85	32	31.977	0.07
29	34	13.286	60.92	44	35.612	19.06
30	26	18.517	28.78	32	14.650	54.22
31	11	8.041	26.90	14	11.766	18.29
32	29	9.674	66.64	41	30.363	25.94
33	27	26.625	1.39	46	53.331	15.94

Rozrzut wyników pomiędzy wyjściem modelu i wyjściem obiektu po przebiegu 50 tys. km wynosi średnio 90%, co świadczy o słabym dopasowaniu wielomianu aproksymującego, jednakże już w przypadku przebiegu 100 tys. km sytuacja jest znacznie poprawiona. Średnia wartość błędu pomiędzy wyjściem obiektu i modelu wynosi 50%, ponadto zostaje zachowany charakter rozkładu wartości zużycia co przedstawiono na rys. 38 zawierającym wartości wyjść obiektu oraz wyjść modelu po przebiegu 100 tys. km.



Rys. 38. Porównanie wartości wyjścia obiektu oraz wyjścia modelu po przebiegu 100 tys. km.

Otrzymane optymalne wartości parametrów chropowatości R_q , R_{sk} , R_{ku} stanowią punkt wyjścia do dalszych prac. Celem tych prac jest opracowanie technologii wykonania warstwy wierzchniej charakteryzowanej optymalnymi wartościami wymienionych parametrów. Zadanie to wykracza poza ramy niniejszego opracowania, a jego temat możnaby sformułować w sposób następujący:

Opracowanie funkcji konstituowania warstwy wierzchniej chromowanych tulei cylindrowych o zadanych wartościach parametrów jej chropowatości; R_q , R_{sk} , R_{ku} .

9. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE.

1. Jest możliwe sterowanie trwałością silnika spalinowego, co wykazano na przykładzie optymalizacji trwałości węzła TPC (tłok, pierścienie tłokowe, tuleja cylindrowa), a w szczególności optymalizacji trwałości warstwy wierzchniej tulei cylindrowych.
2. Dla realizacji sterowania trwałością celowym wydaje się zastosowanie opracowanej i przedstawionej w niniejszej pracy metody.
3. Metoda ujmuje proces zużycia w sposób systemowy oraz zakłada możliwość dekompozycji problemu sterowania trwałością.
4. Metoda ta bazuje na założeniu, że silnik jest eksploatacyjną strukturą szeregowo - równoległą, przy czym o jego trwałości decyduje trwałość węzłów włączonych w strukturę szeregowo. Przyjęto dalej, że sterowanie trwałością silnika odbywa się poprzez sterowanie trwałością jego węzłów.
5. W metodzie dąży się do identyfikacji procesu zużycia - do jego matematycznego modelu włącznie - przy czym identyfikacja ta bazuje na wynikach odpowiednio przeprowadzonych badań eksploatacyjnych.
5. W metodzie przyjmuje się wieloetapowość badań eksploatacyjnych. Po każdym etapie następuje ograniczenie ilości branych do rozważań czynników wpływających na proces zużycia tak, by w rezultacie mieć możliwość budowy modelu matematycznego zawierającego relacje między czynnikami najbardziej istotnymi, a wartościami zużycia.
6. Optymalizacja trwałości bazuje na analizie modelu matematycznego.
7. Przykład metody podano w sterowaniu trwałością silnika o zapłonie samoczynnym.
8. Przyjęto, że szeregowym węzłem struktury niezawodnościowej silnika decydującym o jego trwałości jest węzeł TPC. Przeprowadzono jego systemową identyfikację dokonując dekompozycji problemu trwałości tego węzła do zagadnienia trwałości warstwy wierzchniej tulei cylindrowej.

9. Zaproponowano i zrealizowano trzyetapową procedurę badań:
- w pierwszym etapie, na podstawie wstępnej oceny, wytypowano parametry węzła TPC wpływające na proces zużycia oraz wyznaczono 11 z nich do dalszej analizy,
 - w drugim etapie opracowano plan eksperymentu (sympleksowy A - optymalny) dla wyznaczonych w pierwszym etapie 11 czynników i przeprowadzono badania symulacyjne. W wyniku realizacji tego etapu powstał liniowy model matematyczny. Analiza tego modelu pozwoliła na wytypowanie do dalszych badań trzech czynników najbardziej istotnych, oraz zaproponowanie konfiguracji węzła TPC, przy której zużycie powinno być najmniejsze.
 - w trzecim etapie opracowano kompozycyjny plan eksperymentu, przy czym z czynnikowego planu eksperymentu etapu drugiego wzięto tylko te kolumny, które odpowiadają czynnikom istotnym i rozbudowano je o punkty gwiazdne planu i punkt centralny. Przeprowadzono badania eksploatacyjne. Ich wyniki posłużyły do opracowania modelu matematycznego, który w przeciwieństwie do modelu otrzymanego po drugim etapie jest stopnia drugiego i ujmuje wpływ na proces tylko 3 czynników.
10. Stwierdzono, że analiza regresji wartości zużycia chromowanych tulei cylindrowych otrzymanych w wyniku prowadzenia badań wg kontrolowanego eksperymentu biernego (bez stosowania proponowanej metody badań) , nie daje podstaw do optymalizacji parametrów chropowatości ich warstwy wierzchniej, ponieważ otrzymane modele charakteryzują się małymi wartościami współczynników korelacji wielowymiarowej oraz dużymi średnimi wartościami błędu bezwzględnego.
11. W przeciwieństwie do powyższego, w efekcie analizy regresji wyników badań przeprowadzonych wg zaproponowanej metody prowadzenia badań trwałościowych węzła TPC, otrzymuje się modele charakteryzujące się dużymi wartościami współczynników korelacji wielowymiarowej oraz małymi średnimi wartościami błędów bezwzględnych dopasowania.
12. Analiza modelu matematycznego pozwala np. na wybór parametrów chropowatości warstwy wierzchniej tulei cylindrowej i przez to na sterowanie jej trwałością.
13. Jak wykazano, trwałość ta może zmieniać się w bardzo szerokich gra-

nicach przy stosunkowo niewielkich zmianach wartości parametrów sterowania, a szczegółowa analiza modelu matematycznego pozwala wyznaczyć optymalne wartości parametrów chropowatości tulei cylindrowych oraz przedstawić prognozę ich hipotetycznej trwałości. Trwałość ta może kilkakrotnie przewyższać trwałość tulei stosowanych obecnie.

Powyższe zdaje się świadczyć o celowości stosowania metody.

Uwagi o charakterze utylitarnym.

1. Jeśli przyjąć, że zacytowana w tej pracy procedura opisu kinetyki masowego zużycia materiału wywołanego kawitacją [66] jest adekwatna do opisu zużycia warstwy wierzchniej tulei cylindrowej, to przedstawiony model matematyczny kinetyki mógłby być przydatny przy zdeterminowanych intensywnościach obciążeń elementu. Cytowany w dalszej części pracy model matematyczny procesu zużycia wg [48], nadaje się do zastosowania przy losowych intensywnościach obciążeń. Całość stanowi zatem kompletny opis matematyczny kinetyki zużycia, wymaga jednak weryfikacji badawczej.

W tym miejscu należy dodać, że w problematyce optymalizacji warstwy wierzchniej tulei cylindrowej istotne jest zużycie liniowe, a nie masowe, którego kinetykę ujmują omówione modele.

2. Przedstawiono identyfikację mikrogeometrii warstwy wierzchniej tulei cylindrowych. Wykazano, że parametrami chropowatości, których wartość ma istotny wpływ na przebieg procesu zużycia tej warstwy są:

R_q - średnie kwadratowe odchylenie profilu chropowatości,
 R_{ku} - kurtoza profilu chropowatości,
 R_{sk} - współczynnik skośności profilu chropowatości,

Jak widać, w analizie procesu zużycia istotne są pewne wielkości statystyczne, które otrzymuje się na podstawie analiz profilogramów, a nie bezpośrednio mierzone parametry opisujące warstwę wierzchnią.

3. Stwierdzono, na podstawie pomiaru zużycia 102 sztuk tulei cylindrowych oraz analizy statystycznej ich wyników, że:

- występuje asymetria zużycia, gdyż średnia wartość zużycia w jednym z kierunków pomiarowych (trzecim) tulei cylindrowych silnika 6CT107 jest istotnie większa od wartości zużycia w pozostałych kierunkach pomiarowych.
- umiejscowienie tulei cylindrowej w różnych gniazdach silnika typu 6CT107 nie ma istotnego wpływu na maksymalną wartość jej zużycia,
- najlepiej dopasowanym rozkładem statystycznym opisującym wyniki pomiarów wartości zużycia po przebiegu 50 i 100 tys. km we wszystkich kierunkach pomiarowych jest rozkład Weibulla.

Prawidłowości te nie muszą być prawdziwe dla innych typów silników spalinowych. Stąd wniosek, że przed przystąpieniem do badań optymalizacji warstwy wierzchniej tulei cylindrowych należy przeprowadzić analizy statystyczne asymetrii wartości ich zużycia w gniazdach i kierunkach pomiarowych.

- Przeprowadzono analizę regresji wartości zużycia otrzymanych na podstawie kontrolowanego eksperymentu biernego. Pozwoliło to na stworzenie modeli opisujących tę wartość po przebiegu 50 i 100 tys. km. Współczynniki korelacji wielowymiarowej: $R_{50}^2 = 0.266$ i $R_{100}^2 = 0.391$ tych modeli oraz duże średnie wartości błędu bezwzględnego równe odpowiednio: $\Delta z_{50} = 54.29\%$ i $\Delta z_{100} = 42.58\%$ wskazują na mały związek pomiędzy wartościami wyjść obiektu i modelu, zarówno po przebiegu 50 jak i 100 tys. km, co nie daje podstaw do optymalizacji wartości parametrów chropowatości ich warstwy wierzchniej.
- Badania procesu zużycia warstwy wierzchniej chromowanych tulei cylindrowych zrealizowane wg opracowanej i wprowadzonej tu metody prowadzenia badań trwałościowych węzła TPC, pozwoliły na otrzymanie modeli matematycznych charakteryzujących się wysokimi wartościami współczynników korelacji wielowymiarowej ($R_{50}^2 = 0.895$ i $R_{100}^2 = 0.999$). Wartości błędów bezwzględnych dopasowania były niskie (równe: $\Delta z_{50} = 14.23\%$ i $\Delta z_{100} = 0.54\%$), co wskazuje na bardzo dużą korelację modelu z odpowiedziami obiektu badań i potwierdza celowość stosowania metody.
- Korzystając z wielomianów aproksymujących, otrzymanych po badaniach prowadzonych w ramach metody badań trwałościowych węzła TPC, otrzymano optymalne wartości parametrów R_q , R_{sk} , R_{ku} . Jako kryterium

optymalizacji wybrano minimalną wartość zużycia. Wartości te to:

$$R_q = 1.00 \text{ } \mu\text{m},$$

$$R_{sk} = -1.76,$$

$$R_{ku} = 6.29.$$

Warstwa wierzchnia tulei cylindrowej o takich wartościach parametrów charakteryzuje się średnim poziomem chropowatości. $R_q = 1.00 \text{ } \mu\text{m}$ umiejscowione jest w około 1/3 wartości przedziału zmienności zanotowanego dla rozpatrywanych tulei. $R_{ku} = 6.29$ charakteryzuje powierzchnię o stosunkowo dużej nośności. Jest to wartość umiejscowiona w około 3/4 przedziału zmienności R_{ku} . R_{sk} reprezentuje początek przedziału zmienności dla R_{sk} i opisuje powierzchnię z mocno rozbudowaną fazą plateau i nielicznymi głębokimi bruzdami.

Prognozowana wartość zużycia po przyjęciu optymalnych wartości parametrów R_q , R_{sk} , R_{ku} wyliczonych na podstawie modelu matematycznego wynosi $8.0 \text{ } \mu\text{m}$. Jeśli przyjąć nieoptymalne wartości tych parametrów, to może ona być równa $136.4 \text{ } \mu\text{m}$. Wartość zużycia najczęściej występująca w eksploatacji naturalnej, wyznaczona w wyniku analiz statystycznych zużycia tulei wynosi $32 \text{ } \mu\text{m}$.

Jak widać z powyższego zestawienia istnieją hipotetyczne możliwości czterokrotnego obniżenia wartości zużycia tulei. Natomiast przy założeniu, że zużycie gamiczne wynosi $50 \text{ } \mu\text{m}$ (grubość warstwy chromu) a zużycie tulei o optymalnych parametrach WW wynosi $8 \text{ } \mu\text{m}$ można spodziewać się nawet sześciokrotnego obniżenia wartości zużycia tulei.

Jest rzeczą zastanawiającą, że otrzymany obraz warstwy wierzchniej, przy przyjęciu optymalnych wartości parametrów, nie odbiega w zasadzie od tego, jaki spotyka się w tulejach stosowanych dotychczas. Jednak novum jest tu mniejsza ilość głębokich bruzd.

Wykazano zatem, że odpowiedni kształt warstwy wierzchniej wpływa bardzo istotnie na trwałość tulei.

10. LITERATURA

- [1]. Augustyn W. "Opracowanie metody opisu struktury geometrycznej powierzchni tulei cylindrowej", Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Praca doktorska, Wrocław, 1984,
- [2]. Augustyn W., Drela I. i inni, "Chromowanie tulei cylindrowych o zwiększonej odporności na zużycie", Sprawozdanie nr 061/86, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1986,
- [3]. Augustyn W., Kaźmierczak A. i inni, "Badania eksploatacyjne tulei cylindrowych z nowymi odmianami chromu porowatego", Sprawozdanie nr 048/83, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1983,
- [4]. Balcers E.A., i inni, "Uskorenie ispytywania przywodnych cepiej na iznasziwani!", Międzynarodnyj Konferenc TRIBO '85, Taszkient 1985, nadzieznosti", Kijew, Naukowa dumka, 1987,
- [5]. Bartz W.I., "Energieeinsparung durch tribologische Maßnahmen", Mat. 6 Internationales Kolloquium - Januar 1988 - Technische Akademie Esslingen - Band I.,
- [6]. Bendat I.S., Piersol A.G., "Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych", Warszawa, PWN 1976,
- [7]. Bernhardt M., "Silniki samochodowe", WKŁ, Warszawa 1988,
- [8]. Bobrowski D., "Modele i metody matematyczne w teorii niezawodności", Warszawa, WNT, 1985,
- [9]. Cichy M., "Nowe podejście do obliczania sił bezwładności w mechanizmie korbowym", Międzynarodowa Konferencja Silnikowa Kones'93, Gdańsk - Jurata, 1993,
- [10]. Czarczyński A., Drogowski J., Osuchowski K., "Analizator stanu smarowania silnika spalinowego", Pomiary Automatyka Kontrola, luty, 1981,
- [11]. Dąbrowiecki K., Kaźmierczak A. i inni, "Chromowanie tulei cylindrowych o zwiększonej odporności na zużycie. Etap V", Sprawozdanie nr 050/90, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990,
- [12]. DIN 4776, "Rauheitsmessung. Kenngrößen R_k , R_{pk} , R_{vk} , M_{r1} , M_{r2} zur Beschreibung des Materialanteils im Rauheitsprofil. Meßbedingungen.",
- [13]. Drela I., Kaźmierczak A. i inni, "Chromowanie tulei cylindrowych o zwiększonej odporności na zużycie. Etap II", Sprawozdanie nr

- 175/88, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1988,
- [14]. Drela I., Kaźmierczak A. i inni, "Chromowanie tulei cylindrowych o zwiększonej odporności na zużycie. Etap IV", Sprawozdanie nr 111/89, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1989,
 - [15]. Drozd Cz., Kuśmidrowicz J., Miksiewicz K., "Badania trwałościowe silnika doładowanego typu 6CT107", Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1977,
 - [16]. Drozd Cz., Kuśmidrowicz J. i inni, "Badania stanowiskowe trwałościowe układu T.S.P.C. na silniku 6CT107", Sprawozdanie nr 326, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1976,
 - [17]. Drozd Cz., Kaźmierczak A. i inni, "Badania porównawcze trwałości tulei cylindrowych silników 6C107 i 6CT107 na podstawie prób hamownianych i eksploatacyjnych", Sprawozdanie nr 044/87, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1987,
 - [18]. Drozd Cz. Kaźmierczak A. i inni, "Badania porównawcze trwałości tulei cylindrowych silników 6C107 i 6CT107 na podstawie prób hamownianych i eksploatacyjnych Etap II", Sprawozdanie nr 170/88, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1988,
 - [19]. Englisz K., "Porszniewyje kolca", Maszgiz, Moskwa 1962,
 - [20]. "Fizyczne aspekty trwałości i niezawodności obiektów technicznych", TPPT PAN, Warszawa, 1969,
 - [21]. Gercbach I.B., Kordoński Ch.B., "Modele niezawodnościowe obiektów technicznych", Warszawa, WNT, 1968,
 - [22]. Gerve A., "Zur Strategie der Verschleißforschung", 8. Internationales Kolloquium, Januar 1992, Tribologie, Technische Akademie Esslingen,
 - [23]. Górecka R., Polański Z., "Metrologia warstwy wierzchniej", WNT, Warszawa, 1983,
 - [24]. Greenwood J.A., Williamson J.B.P., "Contact of nominally flat surfaces. Proc. Roy. Soc. London, A295 (1966), s.300-319,
 - [25]. Hebda M., Janicki D., "Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji", WKiŁ Warszawa 1977,
 - [26]. Hebda M., Mazur T., Pelc H., "Teoria eksploatacji pojazdów", WKŁ, Warszawa, 1978,

- [27]. Iskra A., "Odstępstwa od założonego rozkładu nacisków pierścienia na gładź wywołane zużyciem elementów grupy tłokowo - cylindrowej", Eksploatacja Silników Spalinowych - Seminarium, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1993,
- [28]. ISO 4287/1 - 1984, "Surface roughness - Terminology - Part 1. Surface and its parameters.",
- [29]. Jankowski A., Sęczyk J., "Metodyka badań przyspieszonych na silnikach pełnowymiarowych", Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Sprawozdanie nr 3.459, Wrocław, 1975,
- [30]. Jankowski M., Żółtowski B., "Ocena luzów grupy korbowo - tłokowej na podstawie sygnału drganiowego", Eksploatacja Silników Spalinowych - Seminarium, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1993,
- [31]. Jędrzejowski J., "Mechanika układów korbowych silników samochodowych", WKŁ, Warszawa 1986,
- [32]. Kacprzyński B., "Planowanie eksperymentów. Podstawy matematyczne", WNT, Warszawa 1974,
- [33]. Kasprzak B., Tomaszewski F., "Ocena trwałości tulei cylindrowych przy nie znanym wymiarze granicznym zużycia" Eksploatacja Silników Spalinowych - Seminarium, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1993,
- [34]. Kaźmierczak A., Kuśmidrowicz J., "Dobór wartości parametrów struktury warstwy wierzchniej tulei cylindrowych silników spalinowych", Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Sprawozdanie nr S/058/91, Wrocław, 1991,
- [35]. Kaźmierczak A., Kuśmidrowicz J., "Stanowisko do badań pary trącej tuleja cylindrowa - pierścienie tłokowe", Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Sprawozdania, Wrocław, 1988,
- [36]. Kaźmierczak A., Kuśmidrowicz J. i inni, "Opracowanie technologii i wykonanie filtrów sadzy oraz powłok ceramicznych i Cr", Sprawozdanie nr 042/91, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1991,
- [37]. Kordonskij H. B., "Werotnostnyj analiz processa iznasziwania", Moskwa, Nauka, 1968,
- [38]. Kozaczewski W., "Konstrukcja złoża tłok - cylinder silników spalinowych", WKŁ, Warszawa 1987,
- [39]. Krzysztofiak M., Urbanek D., "Metody statystyczne", PWN, Warszawa 1975,
- [40]. Longuet-Higgins M.S., "The statistical analysis of a random,

- moving surface, Phil. Trans. Roy. Soc. London, A249 (1957), s. 321- 387,
- [41]. Mańczak K., "Technika planowania eksperymentu", WNT, Warszawa 1976,
 - [42]. Materiały reklamowe AVL. Graz, Austria, 1993,
 - [43]. Mihlin W. M., "Prognozirowanie technicznego sostojanja maszin", Moskwa, Kolos, 1976,
 - [44]. Miksiewicz K., "Analiza wpływu parametrów pracy silnika spalino-
wego na zużycie węzłów ciernych", Praca doktorska, Instytut
Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej,
Wrocław 1982,
 - [45]. Miller J. G., "Living Systems", Prakseologia Nr 34, Warszawa,
1969,
 - [46]. Morsbach M., Jören P., "Praxisrelevante Verschleißermittlung
an Kolbenring- und Zylinderlaufflächen", MTZ 52 (1991), s.126-132,
 - [47]. Nayak P. R., "Random process model of rough surfaces", Trans.
ASME, J. Lub. Tech., 93F (1971), s.398-407,
 - [48]. Niewczas A., "Modelowanie procesu zużycia", Praca habilitacyjna,
WSI Radom, 1989,
 - [49]. Niewczas A., "Radioizotopowe metody pomiaru zużycia niektórych
części silnika samochodowego", Politechnika Warszawska, 1976,
 - [50]. Nowak A., "Analiza wyężeniowa korbowodu silnika spalinowego przy
nowym ujęciu kinematyki i dynamiki układu korbowego", Praca
dyplomowa, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki
Wrocławskiej, Wrocław 1992,
 - [51]. Nowakowski T., "Wpływ warunków użytkowania na niezawodność pojazdu
na przykładzie autobusu miejskiego PR110U, Praca doktorska,
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki
Wrocławskiej, Wrocław, 1980,
 - [52]. Peklenik J., "New developments in surface charakterization and
measurements by means of random process analysis", Proc.
Institution of Mechanical Engineers, Vol. 182, Part 3K, 1968-69,
s. 108-126,
 - [53]. Pereverzev E. S., "Sluczajnyje processy v parametriczeskich model-
jach nadeżnosti", Kiev, Naukowa Dumka 1987,
 - [54]. Pieper V., "Anwendungen von Charakteristikender Niveauüberschrei-
tungen bei stochastischen Prozessen in der Zuverlässigkeits-
arbeit", Fachtung Qualitätsanalisa, Frankfurt, O (1977),
 - [55]. Pieper V., "Statistische Auswertung von Verschleißwertungen und
ihre Anwendung zur Betriebsdauerprognose", Schmierungstechnik, 12

- (1981),
- [56]. PN-87/M-04251, "Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Wartości liczbowe parametrów.",
 - [57]. Pn-87/M-04256/02, "Struktura geometryczna powierzchni. chropowatość powierzchni. Terminologia ogólna.",
 - [58]. Polański Z., "Metody optymalizacji w technologii maszyn", PWN, Warszawa 1977,
 - [59]. Praca zbiorowa, "Projektowanie pierścieni tłokowych", Ministerstwo Przemysłu, Warszawa, 1974,
 - [60]. Pronikow A.S., "Nadieżność maszyn", Maszynostrojienie, Moskwa, 1978,
 - [61]. Pytko S., "Podstawy tribologii i techniki smarowniczej", Instytut Podstaw Budowy Maszyn AGH, Kraków 1989,
 - [62]. Pytko S., Pytko P, Stolarski B., "Problemy energetyczne i zasobów mineralnych oraz związane z nimi tendencje rozwoju przemysłu samochodowego", Mat. 7 Internationales Kolloquium - Januar 1990 - Technische Akademie Esslingen,
 - [63]. "Qualitätskontrolle in der Automobilindustrie", 2. Auflage, Kap. 4, VDA,
 - [64]. Rekxa M., "Analiza możliwości wyznaczenia rozkładu nacisków promieniowych w pierścieniach tłokowych", Praca doktorska Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1979,
 - [65]. Rudzīt J.A., Kaczeſtvo powerchnosti i eksploatacionnyje ſwojſtwa detalej maszyn i priborow", Riſkiſij politechničeſkiſij inſtitut, Riga, 1982,
 - [66]. Sitnik L., "Beeinflussung des Festkörpers durch den kavitierenden Flüssigkeitsstrahl", Praca habilitacyjna, Dresden, 1987,
 - [67]. Sitnik L., "Metody systemowe w trwałościowych badaniach silników spalinowych", Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1978,
 - [68]. Sitnik L., "Niektóre aspekty zużycia kawitacyjnego tulei cylindrowych silników spalinowych", Praca doktorska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1977,
 - [69]. Sitnik L., "Technika komputerowa a metody obliczeniowe silników spalinowych na przykładzie kinematyki układu korbowego", Konferencja Motor Comput'89.
 - [70]. Sitnik L., Sroka Z., "Analiza zużycia tulei cylindrowych w obsza-

- rze GMP pierwszego pierścienia silnika SW400", XIII Konferencja Naukowa KONES'87, Lublin - Kazimierz Dolny 1987,
- [71]. Smalko Zb., Podstawy projektowania niezawodnych maszyn i urządzeń mechanicznych", PWN, Warszawa, 1972,
 - [72]. Steidle W., "Kolbengeräusche", K. Schmidt Kolloquium 1974,
 - [73]. Sygniewicz J., "Model uszczelnienia tłoka z pierścieniami w tulei cylindrowej", Międzynarodowa Konferencja Silnikowa Kones'93, Gdańsk - Jurata, 1993,
 - [74]. Szczerek M., Wiśniewski M., "Opis chropowatości powierzchni z punktu widzenia tribologii", Problemy eksploatacji, 3/1992,
 - [75]. Tomaszek H., "Model prognozy zużycia elementów o obciążeniu impulsowym z uwzględnieniem wystąpienia uszkodzeń katastroficznych", Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z.1 (1979),
 - [76]. Tomaszek H., "Model zużycia w teorii eksploatacji", Problemy jakości, nr 3 (1973),
 - [77]. Utler W., "Analytische Verfahren zur Bewertung von Kolbenringwerkstoffen", Goetze-Fachschrift K 26, 5. 1978,
 - [78]. Willis E., "Surface finish in relation to cylinder liners.", Wear, 109 (1986), s. 351-366,
 - [79]. Wiśniewski M., "Interpretacja pomiarów chropowatości powierzchni.", Tribologia, 22 (1991), Poradnik tribologii i tribotechniki (3), s. 7-10,
 - [80]. Wiśniewski M., "Tribologische Auswirkungen der Oberflächenfeinstruktur in konzentrierten Kontakten", Fortschr. -Ber. VDI Reihe 1, VDI - Verlag, Düsseldorf, 1991,
 - [81]. Zamojski W., "Teoria i technika niezawodności", Politechnika Wrocławska, Wrocław, 1976,