

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ZESZYTY NAUKOWE NR 212

MECHANIKA 42



BYDGOSZCZ - 1998

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ZESZYTY NAUKOWE NR 212

MECHANIKA 42

0
1998

BYDGOSZCZ - 1998

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
prof. dr hab. Ojcumiła Stefaniak

REDAKTOR DZIAŁOWY
dr hab. inż. Maciej Woropaj, prof. ATR

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Joanna Ekstowicz-Mąka, Zbigniew Gackowski

Wydano za zgodą Rektora
Akademii Techniczno-Rolniczej
w Bydgoszczy

ISSN 0208-6395

WYDAWNICTWA UCZELNIANE
AKADEMII TECHNICZNO-ROLNICZEJ W BYDGOSZCZY

Wyd. I. Nakład 150 egz. Ark. aut. 9,4. Ark. druk. 10,5. Papier druk. kl. III.

Oddano do druku i druk ukończono w kwietniu 1998 r.

Uczelniany Zakład Małej Poligrafii ATR Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20
Zamówienie nr 5/97

Spis treści

1. Jędrzej Bayer - Badania rzutnika o ograniczonym przepływie powietrza podczas transportu zielonek i słomy	5
2. Zbigniew Dąbek - Wpływ tolerancji wykonawczych elementów na wyniki obliczeń wytrzymałościowych	11
3. Wiktor Kupraszewicz - System doradczy w diagnozowaniu silnika spalinowego wysokoprężnego	25
4. Eugeniusz Ranatowski, Adam Poćwiardowski - Analityczna ocena cyklu cieplnego w procesie spawania w strefie wpływu ciepła przy wykorzystaniu różnych modeli źródeł ciepła	33
5. Michał Styp-Rekowski - Mikrogeometria powierzchni po obróbce metodami wspomaganyimi prądem elektrycznym	47
6. Jan Sadowski, Henryk Oleszycki - Niejednorodność strukturalna we wlewkach próbných z niestopowego żeliwa sferoidalnego	55
7. Zygmunt Stankiewicz, Michał Styp-Rekowski - Konstrukcyjna analiza przyrządu do wykrawania otworów o małych średnicach w laminatach	75
8. Maciej Świtalski, Janusz Zachwieja - Metoda termiczna prostowania płaszczy walczaków obrotowych	85
9. Maciej Świtalski, Janusz Zachwieja - Wpływ własności reologicznych medium smarowego na pracę łożysk ślizgowych rolek nośnych pieców cementowych	93
10. Maciej Woropay, Bogdan Landowski - Analiza symulacyjna procesu eksploatacji w systemie komunikacji miejskiej	103
11. Maciej Woropay, Leszek Knopik, Bogdan Landowski - Trójstanowy model procesu eksploatacji	115
12. Maciej Woropay, Bogdan Landowski, Tomasz Cieszyński - Metoda budowy modelu wstępnego złożonego systemu technicznego (na przykładzie autobusu IKARUS 280)	125
13. Václav Tesař, Kazimierz Peszyński - Wybrane aspekty budowy i zastosowań zaworów strumieniowych	137
14. Bogdan Żółtowski - Uwarunkowania zmian programowych w przedmiotach technicznych	155

BADANIA RZUTNIKA O OGRANICZONYM PRZEPŁYWIE POWIETRZA PODCZAS TRANSPORTU ZIELONEK I SŁOMY

Jędrzej Bayer

Wydział Mechaniczny ATR
Zakład Maszyn Rolniczych
ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Synopsis: Praca zawiera opis budowy i wyniki badań rzutnika o prędkości przepływu powietrza nie przekraczającej 4,5 m/s (0,32 m³/s). Badania wykazały, że podczas transportu siewki zielonek na wysokości 10-15 m i na odległość 20-25 m przepływ powietrza w rzutniku i rurociągu tłocznym nie wspomaga przepływu transportowego materiału a zwiększa tylko zapotrzebowanie na moc.

Słowa kluczowe: rzutniki, transport zielonek i słomy; zmniejszanie zapotrzebowania mocy

1. WSTĘP

Ladowanie ciętych zielonek dmuchawami ssącymi do silosów o wysokości 25-30 m wymaga 10-30 kW mocy na przepływ powietrza, a dodatkowo 0,2 do 0,4 kW na przemieszczenie jednej tony materiału [5]. Transport ciętej zielonki na wysokość 13,5 m rzutnikami, przy wydatku przepływu powietrza 1-2 m³/s (prędkość powietrza 25-30 m/s), wymaga 1,2 kW na tonę przywędniętej zielonki i 0,7 kW/t siewki kukurydzy [6]. Napełnianie silosów przejazdowych siewką kukurydzy, rzutnikami o prędkości przepływu powietrza ograniczonej do 13 m/s, pozwala na osiągnięcie wydajności efektywnej około 80 t/h przy zapotrzebowaniu na moc około 0,3 kW/t [1,4], a nawet do wydajności 100 - 120 t/h przy zapotrzebowaniu na moc wynoszącą 0,2 - 0,3 kW/t [2,3]. Podczas napełniania silosów wiezowych siewką kukurydzy rzutnik osiąga wydajność do 90 t/h przy zapotrzebowaniu na moc 0,3 kW/t [3].

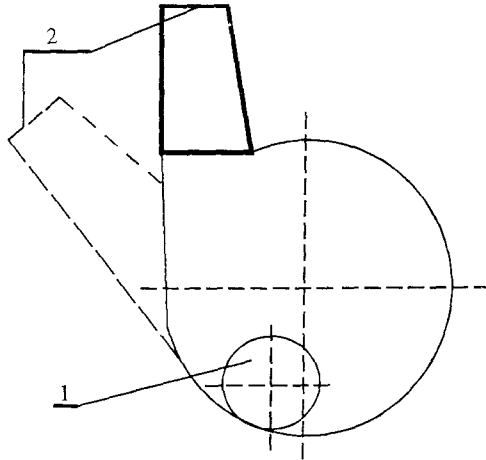
2. CEL BADAŃ

Celem badań jest określenie w jakim stopniu został zmniejszony przepływ powietrza w badanym rzutniku i jak wpływa to na wydajność, zasięg działania i zapotrzebowanie na moc podczas transportu zielonek i słomy.

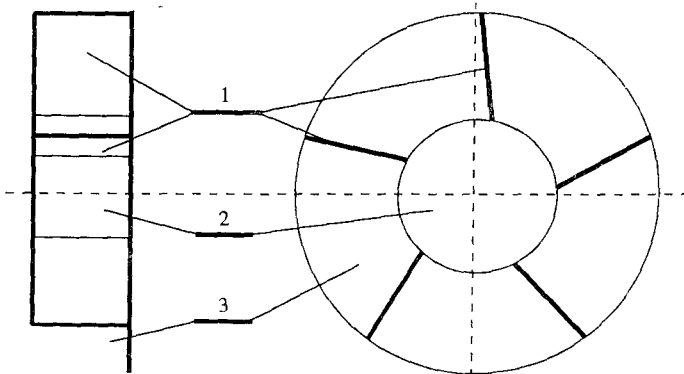
3. BUDOWA BADANEGO RZUTNIKA

Zmniejszenie przepływu i zawirowań powietrza w rzutniku osiągnięto przez:

- 1) zmniejszenie luzów między wirnikiem a obudową,
- 2) zmniejszenie otworu wlotowego do średnicy 0,4 m i usytuowanie go jak na rys.1.
- 3) wypełnienie środka półotwartego wirnika cylindrycznym kołpakiem o średnicy 0,5 m (rys.2).



Rys.1. Usytuowanie otworu wlotowego i wylotowego w rzutniku
1 – otwór wlotowy, 2 – otwór wylotowy

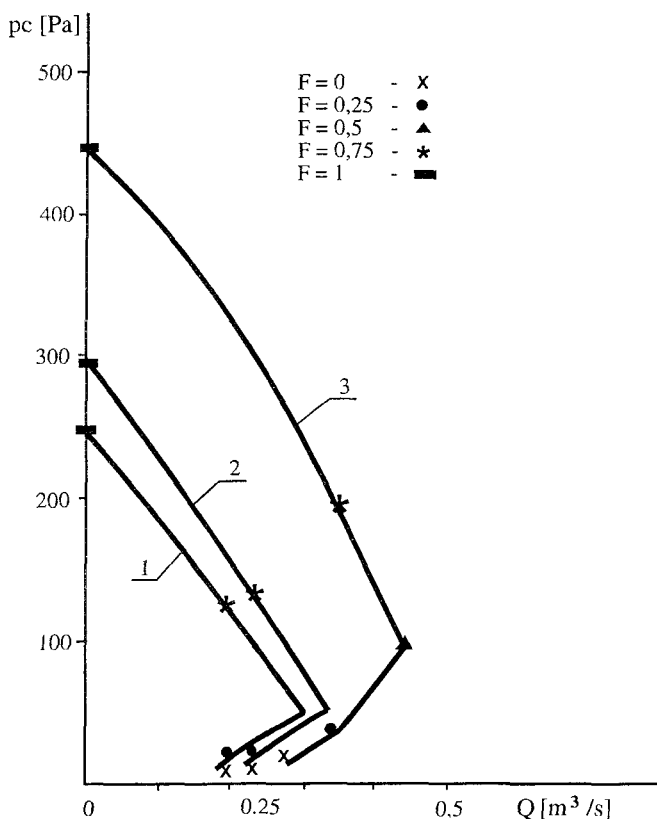


Rys.2. Wirnik rzutnika
1 - łopatką, 2- kołpak, 3-ściana boczna

W badanym rzutniku wirnik o średnicy 1,3 m napędzany bezpośrednio wałem odbioru mocy ciągnika z prędkością 56,5-62,3 rad/s. Króćce wylotowe o średnicy otworu 0,3 m osadzono na obudowie obrotowo (rys.1). Materiał podawano do rzutnika przenośnikiem ślimakowym.

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Krzywe zależności ciśnienia całkowitego (rys.3) i zapotrzebowania na moc (rys.4) w funkcji wydatku przepływu powietrza wykazują, że maksymalny wydatek przepływu powietrza nie występuje przy swobodnym przepływie ($F=0$) lecz po zastąpieniu połowy powierzchni otworu wylotowego rurociągu ($F=0,5$). Zwiększenie stopnia dławienia przepływu powietrza od $F=0$ do $F=0,5$ powoduje wzrost ciśnienia całkowitego i wydatku przepływu powietrza (rys.3), natomiast zapotrzebowanie na moc prawie się nie zmienia przy prędkości wirnika 58,5 i 62,3 rad/s, a maleje przy prędkości 75,88 rad/s (rys.4). Dopiero dalsze dławienie przepływu powietrza (od $F=0,5$ do $F=1$) powoduje wzrost ciśnienia a spadek wydatku oraz zapotrzebowania na moc - podobnie jak w charakterystykach dmuchaw odśrodkowych. Taki przebieg krzywych jest spowodowany zastosowaniem kołpaka o dużej objętości w półotwartym wirniku (rys.2) i świadczy, że przepływ powietrza przez taki rzutnik odbywa się na innych zasadach niż w dmuchawach.



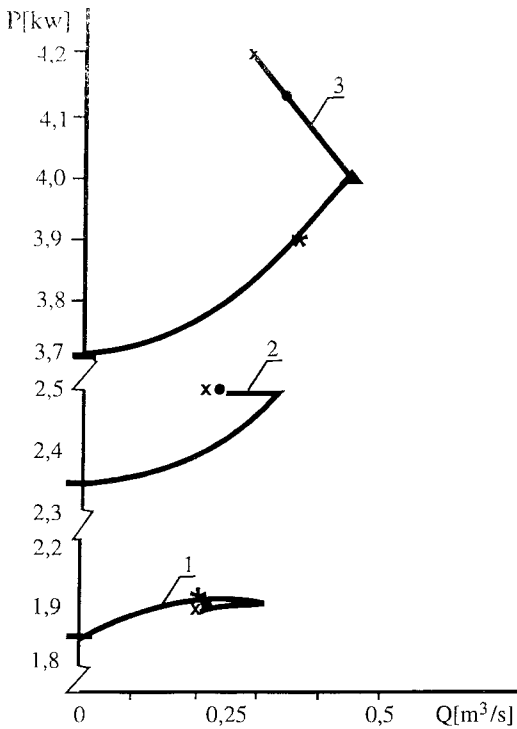
Rys.3. Ciśnienie całkowite w funkcji wydatku przepływu powietrza

F - stopień dławienia przepływu powietrza

1 - $n = 540$ obr/min (58,5 rad/s)

2 - $n = 596$ obr/min (62,3 rad/s)

3 - $n = 725$ obr/min (75,88 rad/s)



Rys.4. Zapotrzebowanie na moc w funkcji wydatku przepływu powietrza

F - stopień dławienia przepływu powietrza

1 - $n = 540$ obr/min (58,5 rad/s)

2 - $n = 596$ obr/min (62,3 rad/s)

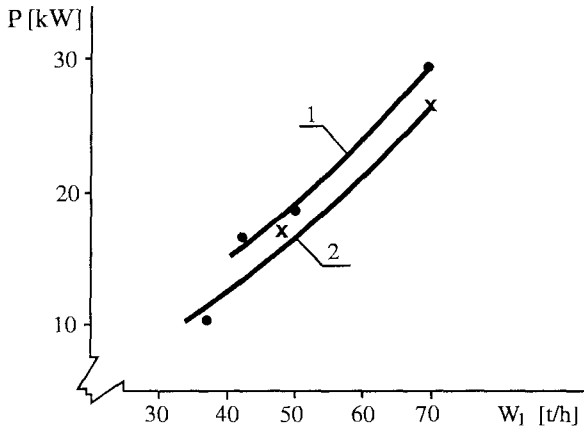
3 - $n = 725$ obr/min (75,88 rad/s)

Krzywe charakterystyki na rys.3 i 4 wskazują, że podczas transportu materiału, maksymalne wartości parametrów przepływu powietrza wynoszą: wydatek - $0,32 \text{ m}^3/\text{s}$, prędkość przepływu powietrza $4,5 \text{ m/s}$, ciśnienie całkowite 100 Pa , a zapotrzebowanie mocy na przepływ powietrza i straty mechaniczne $1,9\text{-}2,5 \text{ kW}$.

Podczas transportu zielonek rzutnik wyposażono w 2 m odcinek rury ustawiony pionowo i pod kątem $0,785$ rad (rys.1). Rzutnik napędzано ciągnikiem Ursus C 355 a materiał ładowano wozem paszowym KTU-10.

Zależność zapotrzebowania na moc od wydajności efektywnej (rys.5) wskazuje, że rzutnik może osiągnąć wysoką wydajność. Maksymalny pionowy zasięg działania wynosi $20\text{-}24 \text{ m}$ przy zapotrzebowaniu na moc $0,38\text{-}0,41 \text{ kW/t}$. Poziomy maksymalny zasięg transportu osiąga odległość $22\text{-}30 \text{ m}$ a zapotrzebowanie na moc $0,28\text{-}0,36 \text{ kW/t}$. Wyższe zapotrzebowanie na moc podczas transportu pionowego niż poziomego jest spowodowane większym oddaleniem otworu wylotowego od wlotowego, co wydłuża drogę tarcia materiału o budowę (rys.1). Rzutnik steruje też słomę jęczmienną z wydajnością $21,5 \text{ t/h}$ ($0,47 \text{ kW/t}$), siewkę trawy łąkowej - $67,5 \text{ t/h}$ ($0,32 \text{ kW/t}$) oraz liście buraków cukrowych $78,9 \text{ t/h}$ ($0,21 \text{ kW/t}$). Ze względu na niską wydajność podawania materiału z wozów paszowych nie osiągnięto maksymalnej wydajności pracy rzutnika. Obniżenie zapotrzebo-

wania na moc rzutnika powoduje też jednocześnie zmniejszenie zużycia energii na transport zielonek.



Rys.5. Wpływ wydajności efektywnej na zapotrzebowanie na moc podczas transportu siewki kukurydzy
1 - transport pionowy.
2 - transport poziomy

5. PODSUMOWANIE

Przy prędkości przepływu powietrza poniżej 4,5 m/s rzutnik może transportować siewkę kukurydzy na wysokość 10-15 m lub na odległość 22-25 m z wydajnością efektywną 36-70 t/h. Ograniczenie przepływu powietrza pozwoliło też na obniżenie zapotrzebowania na moc do 0,38-0,4 kW/t podczas transportu pionowego i do 0,28-0,36 kW/t - poziomego. Rzutnik nadaje się nie tylko do transportu zielonek ale również do stertowania słomy.

LITERATURA

- [1] Bayer J.: Zmniejszenie zapotrzebowania mocy rzutników przez ograniczenie przepływu powietrza. Zeszyty Naukowe ATR 161 w Bydgoszczy, Mechanika 33, 1990, s.72-79.
- [2] Bayer J.: Badania rzutnika do transportu zielonek. Zeszyty naukowe AR 159 w Szczecinie, Rolnictwo LVI, seria techniczna 1993, s.13-16.
- [3] Bayer J.: Wpływ wydajności na energochłonność pracy rzutników podczas ładowania kukurydzy do silosów. Problemy Inżynierii Rolniczej nr 1 (3), 1994, s.61-66.
- [4] Bayer J.: Badania zmodyfikowanego rzutnika do transportu zielonek i słomy. Zeszyty Naukowe ATR 184 w Bydgoszczy, Mechanika 36 1994, s.127-131.
- [5] Bosma A.H.: Pneumatic conveying of forage when loading tower silo's. Research Report 79-2. Wageningen 1997.

- [6] Schirig M.: Einlagerungsleistung und Leistungsbedarf beim Befüllen von Hochsilos mit Fördergebläsen. Grundlagen der Landtechnik nr 2, 1977, s. 41-45.

INVESTIGATION OF BEATER BLOWER WITH LIMITED AIR FLOW
FOR SILAGE MAIZ ANED STRAW TRANSPORT

Summary

Air flow speed in beater blower limited to 4,5 m/s permits of silage maiz transport with capacity 36-70 t/h on horizontal distance 22-30 m (specific power consumption 0,28-0,36 kW/t) or vertical distance 10-15 m (0,38-0,41 kW/t). Straw transport with capacity 21,5 t/h requires 0,47 kW/t. Results of testing show that reduction of air flow speed in beater blower reduces power and energy consumption.

WPLYW TOLERANCJI WYKONAWCZYCH ELEMENTÓW NA WYNIKI OBLICZEŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Zbigniew Dąbek

Wydział Mechaniczny ATR
Katedra Technologii Maszyn
ul. prof. S. Kaliskiego 7. 85-796 Bydgoszcz

W artykule przedstawiono próbę obliczania naprężeń uwzględniając tolerancje wymiarów, obciążeń i własności materiałowych. Artykuł jest próbą zwrócenia uwagi, że obliczenia prowadzone tylko na wartościach nominalnych prowadzą do teoretycznych wyników i należy je uściślić, wprowadzając tolerancje wykonawcze dla elementów materiałnych, oszacowania możliwych zmian wskaźników materiałowych oraz przewidując ewentualne zmiany obciążeń. Obliczenia prowadzi się metodami probabilistycznymi, traktując wielkości tolerowane jako niezależne zmienne losowe.

Słowa kluczowe: obliczenia naprężeń, wielkości tolerowane, obliczenia probabilistyczne

1. WSTĘP

Potrzeba tolerowania, tzn. określania dopuszczalnych wartości wielkości wykonawczych, istniała już od dawna, od kiedy ludzie rozpoczęli produkować przedmioty składające się z elementów składowych i zaistniała potrzeba montażu. W miarę rozwoju techniki wzrastała precyzja wykonania i działania oraz złożoność produkowanych maszyn i urządzeń. Wzrosła również ich powtarzalność - seryjność produkcji. Wprowadzana w coraz większym stopniu automatyzacja wytwarzania poszczególnych elementów, jak również automatyzacja montażu oraz możliwość wymiany zużytych w procesie eksploatacji elementów spowodowały, że potrzeba tolerowania stała się koniecznością.

Z historycznego punktu widzenia należy odnotować fakt, że pierwsi konieczność tę dostrzegli mechanicy. Prawdopodobnie już w roku 1792 w firmie E. Whitnaya po raz pierwszy wprowadzono tolerancje na rysunki techniczne w celu zapewnienia zamienności części.

Przy obecnym poziomie rozwoju techniki potrzeba tolerowania jest wręcz konieczna nie tylko w konstrukcjach mechanicznych, ale we wszystkich prawie dziedzinach przemysłu, a zwłaszcza w elektrotechnice i elektronice, automatyce i inżynierii chemicznej. Wszystko to wynika z faktu, że w procesie wytwórczym nie można uniknąć niedokładności wykonawczych z powodu niedokładności narzędzi i metod wytwarzania, niestety ten fakt jest w wielu przypadkach lekceważony.

Należy się zgodzić z twierdzeniem, że najdoskonalszy nawet model matematyczny nie potrafi precyzyjnie uwzględnić wszystkiego i należy przewidzieć pewien margines

bezpieczeństwa, który zabezpieczałby konstrukcję przed zjawiskami nieprzewidywanymi przez konstruktora. W tym celu wprowadzono tzw. współczynnik bezpieczeństwa, czyli jak to niektórzy popularnie nazywają „współczynnik strachu”, który powoduje pomniejszenie naprężeń dopuszczalnych w zależności od przeznaczenia konstrukcji. Ma to swoje odbicie w pracy konstruktorskiej, kiedy prowadzi się obliczenia jedynie na wartościach nominalnych lekceważąc fakt, że wartości rzeczywiste będą nieco inne i tłumacząc, że „aptekarstwo” nie ma tu zastosowania, bo i tak wszystko to się „zmieści” we współczynniku bezpieczeństwa.

Badaniem wymiarowych skutków odstępstw wymiarów rzeczywistych od wymiarów nominalnych zajmuje się analiza wymiarowa, przy czym bardzo często zawęża się jej zastosowanie jedynie do tzw. łańcuchów wymiarowych.

Klasyczna definicja sformułowana przez B.S. Bałakszina określa łańcuch wymiarowy jako „szereg wymiarów tworzących zamknięty obwód, określający wzajemne położenie lub obroty powierzchni (osi) części”¹. Niestety, definicja ta ma już tylko znaczenie historyczne, ponieważ rozwój analizy wymiarowej poszedł o wiele dalej niż za czasów jej twórców B.S. Bałakszina i N.A. Borodaczewa i rozważania tego typu i tymi samymi metodami można prowadzić w odniesieniu do każdego wzoru, który ma sens techniczny i w którym występują wielkości mierzalne. Zachowując analogię do klasycznej analizy wymiarowej można zatem mówić o analizie wielkości tolerowanych i uogólnionych łańcuchów wymiarowych. Przyjmując, że przedmiotem rozważań mogą być dowolne związki wielkości mierzalnych, można przyjąć następujące określenie: uogólniony łańcuch wymiarowy jest określony wtedy i tylko wtedy, kiedy znane jest przekształcenie:

$$f:(x_1, \dots, x_n) \mapsto y \quad (1)$$

gdzie:

x_1, \dots, x_n - ciąg wielkości składowych,

y - wielkość wynikowa,

przy czym wielkości y oraz x_1, \dots, x_n są wielkościami tolerowanymi. Tolerancję należy przy tym rozumieć ogólnie: nie tylko jako określenie pewnych dopuszczalnych granic wykonania elementów materialnych, ale również np. wytworzenie w piecu określonej temperatury, niedokładność pomiaru, niedokładność regulacji, określenie ilościowe cech materiałowych jak R_r , Q_r , moduł Younga i inne.

Niniejszy artykuł jest próbą spojrzenia na niektóre metody obliczeń, stosowane tradycyjnie w wytrzymałości materiałów i konstrukcji maszyn, przez pryzmat metod stosowanych w analizie wielkości tolerowanych.

Jeżeli wiadomo, że wymiary geometryczne elementu konstrukcyjnego wykonane są z określoną dokładnością (znane są tolerancje poszczególnych wymiarów), obciążenie uznane praktycznie jako stałe może również ulegać niewielkim ale możliwym do przewidzenia zmianom, materiał konstrukcyjny nie jest nigdy jednorodny i jego własności wytrzymałościowe mogą się różnić od założonych, to maksymalne i minimalne wartości naprężeń wynikające z losowego doboru elementów do montażu można w przybliżeniu obliczyć posługując się tzw. metodą różniczki zupełnej:

¹ Bałakszin.B.S.: Razmiernyje cepi. Sprawocznik maszynostroitelja.T.4. Moskwa: 1962, Maszginz.

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_0 \Delta x_i, \quad (2)$$

gdzie:

$\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_0$ - oznacza wartość pochodnej w punkcie odniesienia, tj. dla wartości nominalnych;

Δx_i - oznacza różnicę pomiędzy wartością nominalną a spodziewanym przyrostem zmiennej.

Takie obliczenie prowadzi do określenia wartości skrajnych tj. zaistniałych w wyniku wyjątkowo niesprzyjającego (lub sprzyjającego) zbiegu wartości rzeczywistych poszczególnych elementów i z tego powodu może mieć jedynie charakter informacyjny, ponieważ prawdopodobieństwo takiego zdarzenia jest praktycznie równe zero.

Dobór elementów do montażu ma zwykle charakter losowy, a zatem odchylenia wartości rzeczywistych od wartości nominalnych są również losowe. Prowadzi to do wniosku, że metody obliczeń powinny mieć charakter probabilistyczny, natomiast ich rezultat powinien odpowiadać żądanemu prawdopodobieństwu oceny.

Większość probabilistycznych metod obliczeniowych stosowanych obecnie opiera się na następujących założeniach:

- wartość rzeczywista jest zmienną losową określoną w przedziale wartości granicznych,
- wartość oczekiwana wielkości wynikowej jest równa sumie wartości oczekiwanych wielkości składowych (w przypadku funkcji liniowych),
- wariancja wielkości wynikowej jest równa sumie wariancji wielkości składowych,
- rozkład prawdopodobieństwa wielkości wynikowej jest normalny.

Z rachunku prawdopodobieństwa wiadomo, że w przypadku sumy zmiennych losowych:

$$E(Y) = \sum_{i=1}^n E(X_i), \quad (3)$$

oraz

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_{x_i}^2, \quad (4)$$

gdzie, jak poprzednio, y oznacza wielkość wynikową, a x_i - wielkości składowe.

Jeśli związek wielkości tolerowanych opisany jest funkcją nieliniową, to można przyjąć, że w przybliżeniu spełniona jest równość:

$$E(Y) \approx f[E(X_1), \dots, E(X_n)]. \quad (5)$$

Kolejnym założeniem upraszczającym jest przyjęcie, że spełniona jest równość:

$$E(X_i) \approx Mx_i \quad \text{dla } i=1, \dots, n, \quad (6)$$

gdzie:

Mx_i - jest wartością środkową zmiennej losowej x_i .

Można wprawdzie przyjmować:

$$E(X_i) = Mx_i + \varepsilon_i \frac{T_{x_i}}{2}, \quad (7)$$

gdzie:

T_{x_i} - tolerancja wielkości składowej x_i ,

i próbować oszacować ε_i , ale wobec braku informacji o rozkładach jest to postępowanie zbędne, bo nie tylko nie zwiększy rzetelności wyniku, a może być jeszcze przyczyną dodatkowego błędu. Wariancja zmiennej losowej Y jest w ogólnym przypadku określona następującą zależnością:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_0^2 V(X_i) + \sum_{i=j}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_0 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)_0 \text{cov}(X_i, X_j), \quad (8)$$

gdzie zapis $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_0$ oznacza, że wartość pochodnej liczona jest w punkcie $E(X_1), \dots, E(X_n)$.

Jeśli zmienne losowe są wzajemnie niezależne, to zależność (8) upraszcza się do postaci:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_0^2 \sigma_{x_i}^2}. \quad (9)$$

Aby obliczyć prawdopodobny rozrzut wielkości wynikowej, niezbędne jest określenie rozkładów prawdopodobieństwa wielkości składowych jako zmiennych losowych, dla oszacowania wartości σ_{x_i} oraz rozkładu wielkości wynikowej jako kompozycji (splotu) tych rozkładów dla oszacowania wartości σ_y .

W tym miejscu szereg autorów powołuje się na centralne twierdzenie graniczne, jako podstawę przyjęcia rozkładu normalnego za kompozycję sumy n dowolnych rozkładów. Nie jest to wcale oczywiste, a czasami wręcz błędne i może prowadzić do nierealnych rozwiązań. Przede wszystkim należy zaznaczyć, że centralnych twierdzeń granicznych jest wiele, a każde z nich dotyczy jedynie sumy wielkości składowych, a więc przypadku liniowego i mówi o asymptotycznej zbieżności rozkładu do rozkładu normalnego po spełnieniu odpowiedniego warunku.

Teoria badania sum niezależnych zmiennych losowych bardzo się rozwinęła. Istnieje szereg opracowań monograficznych z tej dziedziny [3,8], gdzie przy bardzo słabych założeniach dowodzi się asymptotycznej zbieżności rozkładu sumy zmiennych losowych do rozkładu normalnego. Bardzo uproszczoną interpretacją tych twierdzeń byłby wniosek, że wystarczy kilka składników i to o dowolnym rozkładzie, aby suma miała rozkład normalny, dlatego też wyniki uzyskane tymi metodami można uznać jedynie jako szacunkowe, orientacyjne.

Wyznaczanie rozkładu prawdopodobieństwa będącego kompozycją dowolnych rozkładów i to w przypadku dowolnych funkcji nie jest jeszcze rozwiązane w matematyce na drodze analitycznej, dlatego też autor proponuje metodę numeryczną [1,2], z zastosowaniem komputera jako urządzenia wspomagającego przy wykonywaniu obliczeń.

2. OPIS METODY

Przyjmuje się, że każda wielkość składowa x_i , $i = 1, \dots, n$ jest niezależną zmienną losową (X_i) skokową o znanym rozkładzie, a więc dany jest tym samym taki ciąg par uporządkowanych (x_{ij}, p_{ij}) , że

$$P(X_i = x_{ij}) = p_{ij}, j = 1, \dots, l_i, \quad (10)$$

gdzie l_i jest liczbą naturalną określającą licznosc zbioru wartosci, jakie moze przybierac zmienna losowa X_i .

Niech ciąg wartości zmiennej losowej X_i będzie oznaczony symbolem X'_i :

$$X'_i = (x_{i,1}, \dots, x_{i,l_i}), \quad (12)$$

oraz symbolem P'_i ciąg wartości prawdopodobieństw odpowiadających wartościom x_{ij} :

$$P'_i = (p_{i,1}, \dots, p_{i,l_i}). \quad (13)$$

Można teraz utworzyć zbiory RX i RP takie, że:

$$RX = X'_1 \times \dots \times X'_n, \quad (14)$$

oraz

$$RP = P'_1 \times \dots \times P'_n. \quad (15)$$

Niech podzbiory zbioru RX będą oznaczone symbolami RX_s , a podzbiory zbioru RP - symbolami RP_s . Podzbiory RX i RP są ze sobą powiązane:

$$RP_s = \{p_{i,j_1}, \dots, p_{i,j_n}\} \Rightarrow RX_s \{x_{i,j_1}, \dots, x_{i,j_n}\}, \quad (16)$$

gdzie $j_i = 1, \dots, l_i$.

Podzbiory RX_s są zdarzeniami losowymi i odpowiadają np. przypadkom losowego doboru części do montażu zespołu, którego wymiary tworzą łańcuch wymiarowy. W przypadku ogólnym jest to zbiór wartości rzeczywistych danego związku wielkości, który zaistniał jednocześnie i powstał na drodze losowej. Prawdopodobieństwo takiego zdarzenia p_s równe jest $p_s = \prod_{RP_s} p_{i,j_i}$.

Zbiór RX zawiera $\prod_{i=1}^n I_i$ podzbiorów RX_s . Obliczając dla każdego podzbioru RX_s wartości y i p_s , otrzymamy ciąg par uporządkowanych (y_s, p_s) . Jeśli wszystkie wartości y_s będą od siebie różne, to można twierdzić, że został określony rozkład zmiennej losowej Y (wielkość wynikowa), ponieważ została określona zależność:

$$P(Y = y_s) = p_s \text{ dla } s = 1, \dots, \prod_{i=1}^n I_i. \quad (17)$$

Może się zdarzyć, że niektóre wartości y_s są sobie równe - wtedy prawdopodobieństwo zdarzenia, że zmienna losowa Y przyjmie wartość y można obliczyć następująco:

$$P(Y = y_s) = \sum_{RX_s: f(RX_s) = y_s} \prod_{RP_s} p_{i,j_i}. \quad (19)$$

Mając określony rozkład prawdopodobieństwa można wyznaczyć dystrybuante wielkości wynikowej Y . W przypadku, kiedy rozkłady wielkości składowych dane są jako rozkłady zmiennej losowej ciągłej - z wystarczającą dla praktyki dokładnością - można je dyskretyzować.

Znajomość przebiegu dystrybuanty wielkości wynikowej daje możliwość podejmowania szeregu decyzji technicznych i ekonomicznych, np. z jakim prawdopodobieństwem można twierdzić, że naprężenia będą się zawierały w określonych granicach.

Metoda ta pozwala również na rozwiązanie deterministyczne i to bez względu na to, czy funkcja jest monotoniczna czy nie. Generując kolejne podzbiory RX_s , dla $s=1, \dots, N$ gdzie $N = \prod_{i=1}^n I_i$, otrzymuje się kolejne wartości y_s , które dadzą również rozwiązanie deterministyczne, ponieważ

$$\begin{aligned} A_y &= \inf_{1 \leq s \leq N} y_s \\ B_y &= \sup_{1 \leq s \leq N} y_s. \end{aligned}$$

Podsumowując powyższe rozważania można przedstawić algorytm metody następująco:

- utworzenie ciągów,

$$X'_i = (x_{i,1}, \dots, x_{i,I_i}) \text{ i } P'_i = (p_{i,1}, \dots, p_{i,I_i}) \text{ dla } i = 1, \dots, n,$$

- obliczenie granicznych wartości wielkości wynikowej na podstawie granicznych wartości wielkości składowych,
- utworzenie zbiorów RX i RP ,
- generowanie kolejnych podzbiorów RX_s i RP_s oraz obliczanie dla każdej generacji wartości y_s oraz p_s ,
- uszeregowanie par uporządkowanych (y_s, p_s) w ciąg rosnący według wartości y_s , poprzez dodanie do siebie wartości następników p_s w przypadku równych po-

przedników y_s , czyli przyporządkowanie wartości y_s prawdopodobieństwa równego

$$\sum_{RX_s: f(RX_s)=y_s} p_s,$$

- wyznaczenie rozwiązania deterministycznego.

Uzyskane w końcowej fazie obliczeń rozwiązanie deterministyczne nie musi się pokrywać z wynikami otrzymanymi w punkcie drugim, gdzie oblicza się wartości graniczne wielkości wynikowej na podstawie wartości granicznych wielkości składowych. Wynik będzie taki sam jedynie w przypadku funkcji monotonicznych z dokładnością do kroku dyskretyzacji wielkości składowych w przypadku funkcji ciągłych.

Jedną z zalet tej metody jest brak jakichkolwiek ograniczeń funkcji opisującej związek wielkości tolerowanych poza tym, że musi być określona dla każdego podzbioru RX_s , co jest oczywiste.

Wadą metody kombinacyjnej jest duża liczba cykli obliczeniowych. Praktyczne zastosowanie tej metody przy obecnie najbardziej popularnych komputerach typu AT PC daje dość dokładne wyniki w przypadkach, kiedy liczba zmiennych nie przekracza 6 - 7.

Aby uniezależnić czas pracy komputera od liczby wielkości składowych, a przy tym nie tracić dużo na dokładności oszacowania, można się posłużyć metodą Monte Carlo, tj. ideą modelowania stochastycznego.

Podobnie jak w metodzie kombinacyjnej należy przyjąć następujące założenia:

- wszystkie wielkości występujące w rozpatrywanym związku są niezależnymi zmiennymi losowymi,
- dana jest funkcja określająca wielkość wynikową,
- dane są rozkłady wielkości składowych.

Początkowo tok postępowania przy przygotowywaniu danych jest identyczny jak w metodzie kombinacyjnej, aż do otrzymania zbiorów X'_i i P'_i . Teraz tworzy się macierz $B = [b_{ij}]$ o rozmiarach $n \times m$, gdzie n jest, jak poprzednio, liczbą wielkości składowych, natomiast m jest dowolną liczbą całkowitą (teoretycznie). Praktycznie jest ona zależna od pojemności pamięci operacyjnej komputera. Każdy wiersz macierzy B odpowiada jednej wielkości X_i . Elementy macierzy b_{ij} wyznacza się następująco:

- oblicza się wartość wyrażeń j_i , $i=1, \dots, l_i$ w ten sposób, że $j = m \cdot p_{ij}$, gdzie p_{ij} są kolejnymi elementami zbioru P'_i , a następnie

- podstawia się:

$$b_{1,1} = b_{1,2} = \dots = b_{1,j_1} = x_{1,1}, \text{ gdzie } x_{1,1} \text{ jest pierwszym elementem zbioru } X'_1,$$

$$b_{1,j_1+1} = b_{1,j_1+2} = \dots = b_{1,j_2} = x_{1,2} \text{ itd. aż do wypełnienia całego wiersza macierzy } B.$$

Analogicznie wyznacza się kolejne wiersze macierzy.

W tym momencie kończy się etap przygotowania danych. Następny, będący już zasadniczym etapem obliczeń, polega na wyznaczeniu rozkładu wielkości wynikowej. Niezbędny jest do tego celu podprogram generujący liczby pseudolosowe z przedziału $(0,1)$. Aby obliczyć wartość funkcji i odpowiadające jej prawdopodobieństwo, należy wygenerować n liczb pseudolosowych q_1, \dots, q_n a następnie przetransponować je na liczby całkowite Q_1, \dots, Q_n z przedziału $(1, m)$. Operacji tej można dokonać następująco:

$$Q_i = \text{Entier}(mq_i), \quad i=1, \dots, n$$

W ten sposób każda wartość Q_i oznacza kolejny numer kolumny macierzy B , z której zostanie pobrana wartość i -tej zmiennej losowej. Po wyznaczeniu liczb Q_1, \dots, Q_n oblicza się wartość wielkości wynikowej:

$$y_s = f(b_{1,Q_1}, \dots, b_{n,Q_n}) \quad \text{dla } s = 1, \dots, N,$$

gdzie: N jest liczbą losowań.

W pamięci komputera przedział wartości $\langle \inf_{1 \leq s \leq N} y_s, \sup_{1 \leq s \leq N} y_s \rangle$ podzielony jest na k podprzedziałów i sprawdza się, do którego podprzedziału trafia obliczona wartość y_s . Cykl obliczeń:

- generowanie liczb pseudolosowych q_s ,
- wyznaczanie liczb pseudolosowych Q_s ,
- obliczanie wartości y_s ,
- stwierdzenie do którego podprzedziału trafia obliczona wartość y_s ,

powtarza się N razy, rejestrując jednocześnie krotność trafienia s -tej wartości y do każdego podprzedziału. Przypisując każdemu podprzedziałowi wartość y_i odpowiadającą środkowi tego przedziału, a następnie przyporządkowując jej wartość ilorazu n_i/N , gdzie n_i jest liczbą trafień do danego przedziału, otrzymuje się ciąg par uporządkowanych $(y_i, n_i/N)$. Ponieważ iloraz n_i/N ma sens prawdopodobieństwa - można twierdzić, że wyznaczony został rozkład zmiennej losowej Y będącej funkcją zmiennych losowych X_1, \dots, X_n , co było celem zadania.

W wyniku obliczeń uzyskuje się:

- rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej Y (funkcja gęstości oraz dystrybuanta);
- parametry opisowe rozkładu (jak w metodzie kombinacyjnej).

W obu tych metodach istotną sprawą jest określenie (założenie) rozkładów prawdopodobieństwa wielkości składowych. Najlepsze wyniki - najbardziej zgodne z rzeczywistością - uzyska się bazując na rozkładach empirycznych wykonywanych wielkości. Jest to jednak możliwe stosunkowo rzadko, np. wtedy, kiedy wymiary wielkości składowych są wykonywane w macierzystej firmie. Projektując konstrukcję, źródłem informacji np. o odchyłkach wymiarowych są programy hutnicze, katalogi producentów lub normy, gdzie podane są jedynie wartości odchyłek dopuszczalnych. Z braku dostatecznych informacji należy więc przyjąć jakiś rozkład teoretyczny. Najczęściej przyjmuje się rozkłady:

- jednostajny,
- trójkątny,
- normalny.

Największe zastosowanie praktyczne ma model rozkładów jednostajnych - jest on nie tylko zalecany w literaturze ale również przez instytucje międzynarodowe zalecające sche-

maty postępowania w określaniu niepewności pomiaru przyjęte w standardach ISO 9000². Przesłanką przemawiającą za przyjęciem takiego modelu jest to, że kompozycja rozkładów jednostajnych będzie rozkładem najmniej skupionym ze wszystkich innych założonych rozkładów modelowych. Oznacza to jednocześnie, że spodziewany rozrzut wartości wielkości wynikowej będzie tym samym największy. Można więc taki model nazwać modelem pesymistycznym.

Model pesymistyczny ma duże zastosowanie praktyczne. Jeśli po dokonaniu obliczeń okaże się, że przewidywany rozrzut wartości wielkości wynikowej, uzyskany przy tym założeniu, jest możliwy do przyjęcia, to oznacza, że przedsięwzięcie może być realizowane w praktyce z dużym marginesem bezpieczeństwa. W rzeczywistości bowiem rozkłady wielkości składowych będą zawsze bardziej skupione wokół wartości oczekiwanej niż rozkład jednostajny, a zatem rzeczywisty rozkład wielkości wynikowej będzie też bardziej skupiony niż to wynika z obliczeń. Rozrzut wartości wielkości wynikowej będzie więc mniejszy. Przy tym założeniu zawsze będziemy po stronie bezpiecznej.

Model rozkładów normalnych jest modelem optymistycznym. Poprzednio była już mowa o rozkładzie normalnym jako matematycznym rozkładzie błędów przypadkowych, kiedy nie ma czynników dominujących, a odchylenia od wartości oczekiwanej są spowodowane sumą małych błędów. W praktyce takich warunków stworzyć się nie da i zawsze będą jakieś czynniki zniekształcające teoretyczną przypadkowość rozkładu normalnego. Ponieważ takich czynników będzie kilka, to można przypuszczać, że będą działały w kierunku zmniejszenia skupienia rozkładu, ale rozkład rzeczywisty będzie rozkładem mniej skupionym niż rozkład normalny - stąd model rozkładów normalny można uznać za optymistyczny.

Kompozycja rozkładów optymistycznych musi dać oczywiście optymistyczny rezultat - to znaczy, że obliczony rozrzut wartości wielkości wynikowej będzie najmniejszy ze wszystkich innych możliwych kombinacji. Może to także mieć znaczenie praktyczne. Jeśli w zadaniu osiągnie się rozwiązanie optymistyczne zbliżone do dopuszczalnego, to można je od razu odrzucić, bo w rzeczywistości rozkłady będą mniej skupione i rozrzut będzie większy.

Kierując się tymi przesłankami autor przyjął w przykładowych obliczeniach założenie, że wielkości składowe mają rozkład jednostajny.

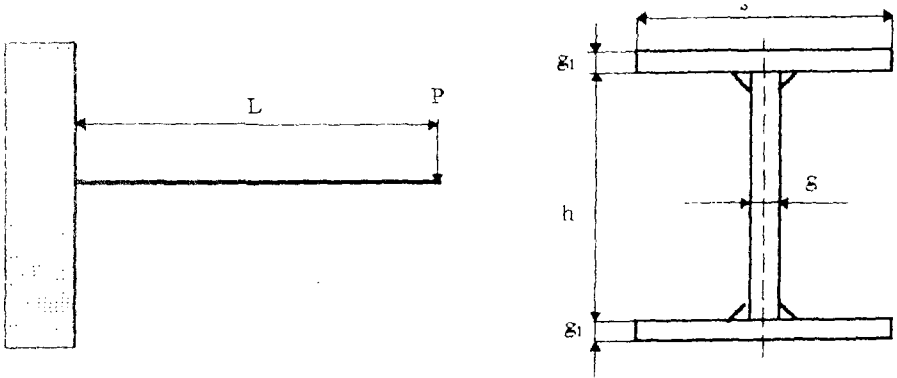
3. PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

PRZYKŁAD 1

Niech będzie dana belka o przekroju dwuteowym jednostronnie utwierdzona i obciążona siłą skupioną, wykonana z elementów spawanych, o wymiarach przedstawionych na rys.1, przy czym niech będą dane następujące wartości liczbowe:

$$h = 130 \text{ mm}, \quad P = 4 \text{ kN} \quad s = 60 \text{ mm}, \quad L = 4 \text{ m} \quad g = g_1 = 6 \text{ mm},$$

² Guidance Document on Measurement Uncertainty. Comité of Testing Laboratories IECE/CTL (Sec) 056/94



Rys 1. Książkowy przykład obliczania naprężeń w spoinach belki zginanej i obciążonej siłą tnącą

Naprężenia w spoinach łączących pas (półkę) ze środkiem oblicza się następująco:

- moment bezwładności całego przekroju belki względem osi x:

$$\begin{aligned}
 J_x &= \frac{gh^3}{12} + 2 \left[\frac{sg_1^3}{12} + sg_1 \left(\frac{h + g_1}{2} \right)^2 \right] = \\
 &= \frac{0.006 \cdot 0.13^3}{12} + 2 \left[\frac{0.06 \cdot 0.006^3}{12} + 0.06 \cdot 0.006 \left(\frac{0.13 + 0.006}{2} \right)^2 \right] = \\
 &= 4.42994 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

- moment statyczny przekroju pasa:

$$S_p = sg_1 \left(\frac{h + g_1}{2} \right) = 0.06 \cdot 0.006 \left(\frac{0.13 + 0.006}{2} \right) = 24.48 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

- naprężenie styczne w miejscu połączenia środka z pasem:

$$\tau = \frac{TS_p}{2J_x a} = \frac{4000 \cdot 24.48 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0.7 \cdot 0.006 \cdot 4.42994 \cdot 10^{-6}} = 2.6314449 \text{ MPa} \leq sk_t$$

gdzie:

a - szerokość spoiny (można przyjąć a = 0.7g)

s = 0.65 - dla spoin pachwinowych, przy ścinaniu

- naprężenie normalne w spoinie:

$$\sigma_g = \frac{M_g y}{J_z} = \frac{4000 \cdot 4 \cdot 0.65}{4.42994 \cdot 10^{-6}} = 234.76616 \text{ MPa} \leq k_t$$

gdzie:

$$y = \frac{h}{2} \text{ odległość spoiny od osi x}$$

– naprężenie zredukowane według hipotezy Hubera:

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma_g^2 + 3\tau^2} = \sqrt{234.76616^2 + 3 \cdot 2.6314449^2} = 234.8104 \text{ MPa} \leq 1.1 k_r.$$

Tak wygląda klasyczny, książkowy³ tok obliczeń. Przyjmując⁴ $k_r = 170 \div 220$ MPa, przy założeniu stałego obciążenia, wartość dopuszczalna $\sigma_{\text{red dop.}} = 187 \div 242$ MPa, a więc można uznać, że obliczenia są poprawne i na tym poprzestać.

Można jednak na to popatrzeć realnie i wyobrazić sobie, że elementy spawane będą wykonane realnie w polskich hutach i będą miały następujące wartości:

$$\begin{array}{ll} h = 130 \pm 2.5 \text{ mm} & g_1 = 6 \pm 0.5 \text{ mm} \\ s = 60 \pm 1.5 \text{ mm} & L = 4000 \pm 5 \text{ mm} \\ g = 6 \pm 0.5 \text{ mm} & P = 4000 \pm 10 \text{ N} \end{array}$$

Tolerancje płaskowników przyjęto wg PN-72/H-84018 dla stali klasy 3, grupy 31 zakładając, że konstrukcja będzie wykonana ze stali 18G2⁵, zaś tolerancje długości belki (dokładności określenia punktu przyłożenia siły) i dokładności określenia obciążenia przyjęto szacunkowo.

Obliczenia można wykonać metodą numeryczną [1,2] przy założeniu, że wielkości h, s, g, g_1, L i P są zmiennymi losowymi o rozkładach jednostajnych (założenie takie zwiększa wiarygodność oceny) a wyniki obliczeń będą wtedy następujące:

Obliczenie naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera

Wartości graniczne: $\sigma_{\text{red min}} = 206.11$ MPa $\sigma_{\text{red max}} = 269.67$ MPa

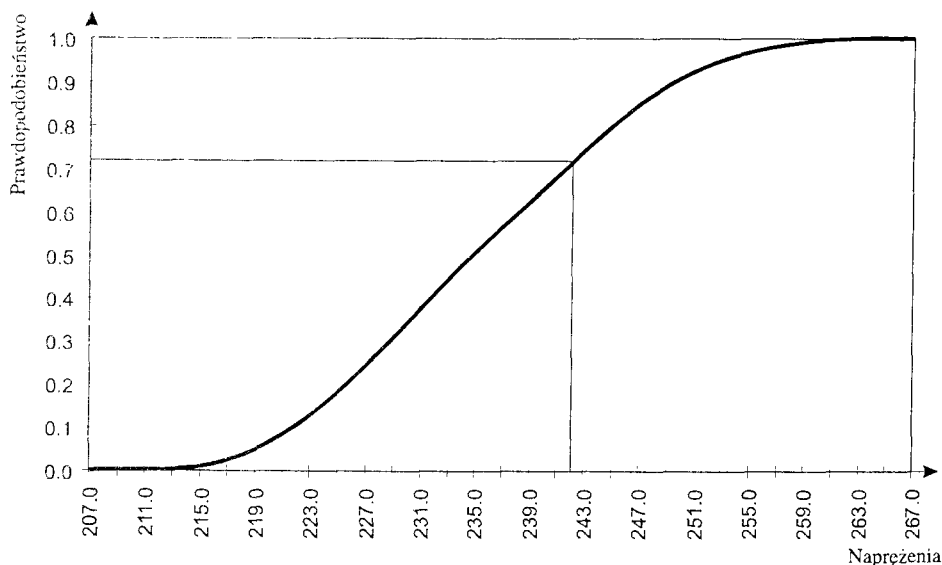
Tolerancja: $T_\sigma = 63.56$ Mpa

Wynika z tego, że jedynie z prawdopodobieństwem ok. 0,72 można twierdzić, że wartość naprężeń zredukowanych (rzeczywistych) obliczona metodą klasyczną będzie nie większa od naprężeń dopuszczalnych. Tym samym prawdopodobieństwo awarii wynosi ok.0.3. Z prawdopodobieństwem 1 można natomiast twierdzić, że naprężenia nie przekroczą wartości 270 MPa, przy czym pewność taką można mieć już od 260 MPa (sądząc z wykresu).

³ np. według: Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.: Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe. Warszawa 1984, PWN, s.196 oraz Mały poradnik mechanika. Praca zbiorowa. T.1, Warszawa: 1985, WNT, s. 342-345.

⁴ według: Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.: Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe. Warszawa 1984, PWN, s.277.

⁵ "Jest to pospolity w świecie typ stali spawalnej stosowanej na konstrukcje i powinien być szeroko upowszechniony". Kubac R., Pilarczyk S., Pronobis A.: Tablice stali zwykłej jakości. Katowice 1981. "Śląsk", s.220.



Rys.2. Otrzymany wykres dystrybuanty określa prawdopodobieństwo, z jakim można twierdzić, że naprężenia przyjmą daną wartość

Przykład 2

Obliczmy teraz strzałkę ugięcia w miejscu obciążenia siłą P dla zadeklarowanych wartości nominalnych, przyjmując wartość $E = 2.1 \cdot 10^5$ MPa:

$$y_L = \frac{PL^3}{3EJ} = \frac{4\text{kN} \cdot (4\text{m})^3}{3 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \text{MPa} \cdot 4.42994 \cdot 10^{-6} \text{m}^4} \approx 0.09173 \text{ m}.$$

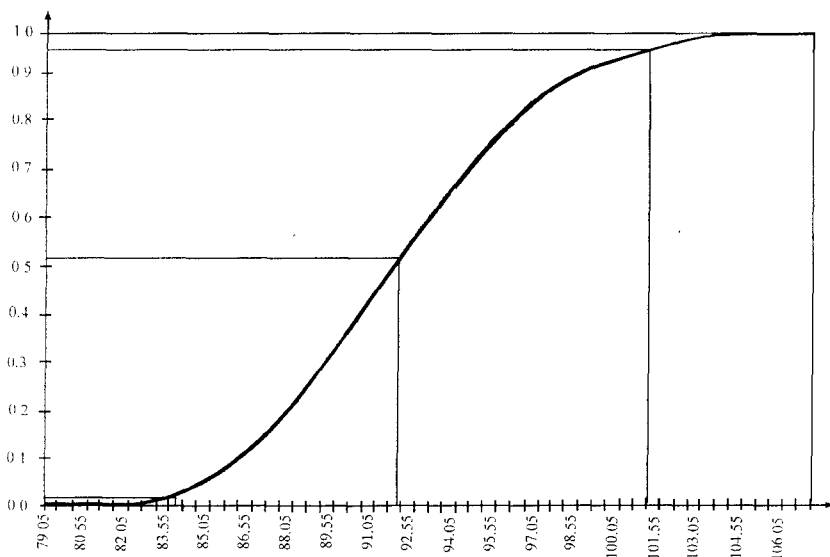
Jest to wartość teoretyczna, przy czym brak jakichkolwiek informacji o ile może się ona różnić od wartości rzeczywistych, jeśli uwzględnimy odchyłki wykonawcze spawane go profilu.

Obliczenie strzałki ugięcia

Wartości graniczne: $y_{\text{min}} = 78.8 \text{ mm}$ $y_{\text{max}} = 107.7 \text{ mm}$

Tolerancja: $T_y = 28.9 \text{ mm}$

Z przedstawionych obliczeń wynika, że teoretycznie wartość strzałki ugięcia może się wahać w przedziale $\langle 78.8 \text{ mm}, 107.7 \text{ mm} \rangle$, a więc różnica spowodowana losowymi odchyłkami wykonawczymi od wartości nominalnych może wynosić nawet ok. 29 mm. Z dużym prawdopodobieństwem (ok. 0.95) należy się spodziewać rozrzutu w granicach $\langle 84.8 \text{ mm}, 101.0 \text{ mm} \rangle$, czyli ok. 16 mm.



Rys.3. Dystrybuanta strzałki ugięcia jako zmiennej losowej

4. WNIOSKI

1. Odchyłki wykonawcze od wartości uznanych za nominalne należy uznać za nieuniknione, a istotność ich wpływu trudno jest z góry przewidzieć bez dokonania stosownych obliczeń.
2. Zastosowanie w tym celu metod deterministycznych, w wyniku których otrzymuje się wartości graniczne, jest wprawdzie postępowaniem teoretycznie poprawnym, ale prowadzi do nadmiernej asekuracji, ponieważ uzyskane wartości odpowiadają zdarzeniom losowym o znikomym małym prawdopodobieństwie.
3. Prawdopodobieństwo oceny często zależy od celu w jakim takie obliczenia się wykonuje, dlatego też autor proponuje metodę probabilistyczną, opartą na zasadzie kompozycji rozkładów prawdopodobieństwa wielkości składowych. W metodzie tej rozkłady prawdopodobieństwa wielkości składowych są dowolne, przy czym autor poleca w przypadku braku wiarygodnych podstaw, przyjęcie rozkładów jednostajnych argumentując to zwiększeniem wiarygodności oceny, jak również powołując się na zalecenia międzynarodowe związane ze standardami ISO 9000.
4. Zamieszczone przykłady pozwolą się zorientować, jaki jest rząd wartości losowego rozrzutu wynikający z przyjmowanych odchyłek wykonawczych.

LITERATURA

- [1] Dąbek Z.: Numeryczne metody analizy wielkości tolerowanych. Wydaw. Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 1980.

- [2] Dąbek Z.: O pewnej metodzie analizy wymiarowej. *Normalizacja* 1976 nr 12, s.14-18.
- [3] Gniedenko B.W., Kolmogorow A.N.: *Rozkłady graniczne sum zmiennych losowych niezależnych*. PWN, Warszawa 1957.
- [4] Kubac R., Pilarczyk S., Pronobis A.: *Tablice stali zwykłej jakości*. Katowice 1981, "Śląsk".
- [5] Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.: *Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe*. PWN, Warszawa 1984.
- [6] *Maly poradnik mechanika*. Praca zbiorowa. T.1, WNT, Warszawa: 1985.
- [7] *Guidance Document on Measurement Uncertainty*. Comité of Testing Laboratories IECEE/CTL (Sec) 056/94.
- [8] Pietrow L.L.: *Summy niezawisimych słuczajnych wieliczimm*. Nauka, Moskwa 1972 1972.
- [9] Polska Norma PN-72/H-84018.

AN EFFECT ELEMENTS WORKING TOLRRANCES ON THE STRENGHT CALCULATION RESULTS

Summary

This paper deals with stresses calculation test including *dimensional tolerances*, loadings and material properties. It is attempt to take heed of nominal values calculations only lead to theoretical results nad one ought to be precise with working tolerances for material elements, possible material indexes change estimation and possible loading changes providing. The calculation were carried with *probability methods* treating tolerancing quantities as independent stochastic variables.

SYSTEM DORADCZY W DIAGNOZOWANIU SILNIKA SPALINOWEGO WYSOKOPRĘŻNEGO

Wiktor Kupraszewicz

Centrum Szkolenia Czołgowo-Samochodowego
64-920 Piła, ul. Podchorążych 1

Zagadnienie oceny stanu technicznego silników spalinowych nabiera szczególnego znaczenia, głównie w fazie eksploatacji, ze względu na uwarunkowania ekonomiczne i ekologiczne. Stosowane obecnie urządzenia diagnozujące stan obiektów takich jak silniki wysokoprężne, ograniczają się jedynie do pomiarów. Interpretacja wyników pomiarów i wnioski z nich płynące głównie zależą od stanu operatora urządzenia. W artykule omówiono problematykę diagnozowania silnika wysokoprężnego i wstępnie przedstawiono projekt testera, wykorzystującego sztuczną inteligencję, wspomagającego decyzję diagnostyczną operatora.

Słowa kluczowe: sztuczna inteligencja, system doradczy

1. WPROWADZENIE

Nie ma żadnego powodu, dla którego nie można aby ułatwić pracy umysłowej w taki sposób, jak to czynimy z pracą fizyczną - stosując maszyny. Już na początku dziewiętnastego wieku pomysł taki nasunął się Anglikowi Charles Babbage. Ówczesne idee stały się rzeczywistością dopiero w dwudziestym wieku.

Od zarania historii maszyn cyfrowych komputery uważane były za naturalne narzędzie badań nad inteligencją, potocznie nazywano je wówczas „elektronicznymi mózgami”. Już dawno udowodniono, że przy pomocy komputera można rozwiązać szereg różnych zadań znacznie szybciej i efektywniej niż to robią ludzie. Jednakże w większości przypadków, aby rozwiązać dany problem wiedza wykorzystywana przez tradycyjny komputer, musiała mu być dostarczona w postaci konkretnego algorytmu. Innymi słowy problem musiał być zadany komputerowi wraz z metodyką, niezbędną do jego rozwiązania.

Sztuczna inteligencja lub krótko SI (ang. artificial intelligence) jest stosunkowo nową interdyscyplinarną dziedziną wiedzy, przedmiotem wielkich oczekiwań i ożywionych debat. W sensie teoretycznym, sztuczna inteligencja łączy w sobie zagadnienia z dziedziny informatyki, psychologii, antropologii, matematyki, elektroniki, neurofizjologii i filozofii.

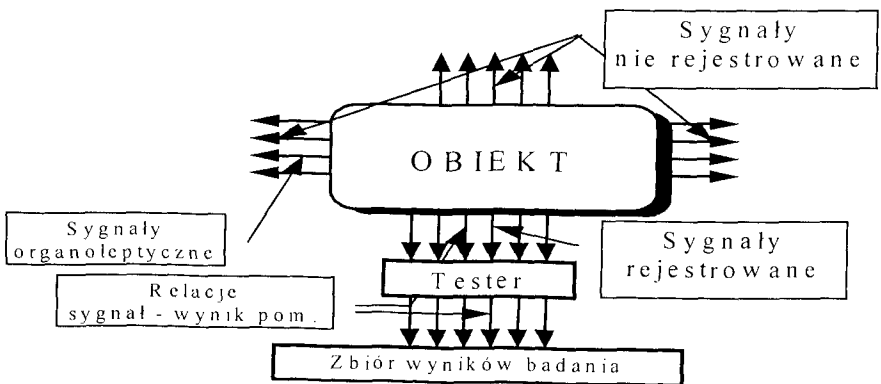
Jako jedno z pierwszych, spośród wielu dyscyplin sztucznej inteligencji, systemy ekspertowe (doradcze) znalazły szerokie zastosowania praktyczne. Przeszło trzydziestoletnia historia rozwoju tej dziedziny ma swoją klasykę, swój okres pionierski i dzisiejszą codzienność. Nieprzypadkowo Feigenbaum nazwał ją „stosowaną sztuczną inteligencją”.

Stale zwiększająca się liczba pojazdów jeżdżących po naszych drogach już sprawiła, że stan techniczny tych dróg jest niedostateczny. Podobny stan wykazują silniki i całe pojazdy. Wystarczającym dowodem są tu wyniki pomiarów, zawarte na tablicach informujących o zawartości składników toksycznych w powietrzu, w różnych godzinach ruchu, w niewrażliwych punktach naszych miast. Stąd coraz większego znaczenia teoretycznego i praktycznego, nabierają zagadnienia precyzyjnej detekcji i szybkiej lokalizacji uszkodzeń w silnikach spalinowych. Podejmowane są próby zastosowania systemów eksperckich (doradczych) do wspomaganiania procesu gromadzenia danych o badanych obiektach (silnikach) oraz wspomaganiania oceny stanu technicznego na podstawie wyznaczonych cech sygnałów diagnostycznych. Cechą szczególną zadań diagnozowania obiektu (silnika spalinowego) jest to, że dotyczą one różnych konstrukcji (silnik o zapłonie iskrowym ZI i silnik o zapłonie samoczynnym ZS, silnik turbinowy). Pociąga to za sobą różnicowanie postaci baz danych i potrzebę specjalizowania baz wiedzy stosowanych w procesie wnioskowania. Dotychczasowe sposoby diagnozowania spalinowego, wysokoprężnego realizowane w warsztatach naprawczych sprowadzają się raczej do intuicji fachowców niż rzetelnej oceny jego stanu na podstawie pomiarów. Dlatego coraz większego znaczenia nabierają metody wykorzystujące przyrządy pomiarowe wyposażone w sztuczną inteligencję.

2. BADANIE DIAGNOSTYCZNE

Proces diagnozowania obiektu rzadko przebiega wg kolejnych ogniw łańcucha przetwarzania informacji diagnostycznej [1]. W praktyce, często wykorzystywane są tylko niektóre ogniwa tego łańcucha, a ich stopień wykorzystania zależy od znajomości obiektu, warunków i zadań. Cały proces, bez względu na którym ogniwie będzie się (diagnoza niekompletna), będzie zaczynał się badaniem diagnostycznym.

Badanie diagnostyczne [9] (rys.1.) stanowi pierwsze ogniwo łańcucha diagnozowania [1] i polega na pomiarze przyrządowym lub rozpoznaniu organoleptycznym wartości sygnałów emitowanych przez obiekt.



Rys.1. Badanie diagnostyczne

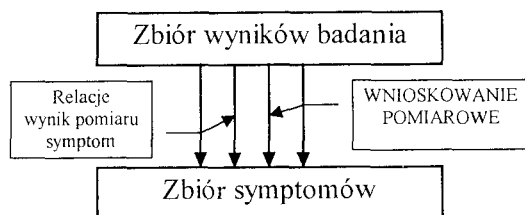
Tworzy się w ten sposób zbiór wyników badania (pomiarów), które zostały zarejestrowane przez tester oraz zbiór wrażeń organoleptycznych, co stanowi pierwotną in-

formację o obiekcie. Badanie diagnostyczne wymaga znajomości relacji pomiarowych ze stanem obiektu. Powinny one uwzględniać warunki badania, właściwości użytej aparatury, naturę fizyczną mierzonych sygnałów, wymaganą dokładność wyników itp.

Należy jednak pamiętać, że uzyskany zbiór wyników badania obarczony jest błędami, zależnymi od metody pomiarowej, dokładności użytych przyrządów. Zatem zbiór ten stanowi jedynie przybliżony obraz rzeczywistego zbioru wartości sygnałów, jednak wystarczający dla wnioskowania pomiarowego w zakresie klasyfikacji stanów.

3. WNISKOWANIE POMIAROWE

Wnioskowanie pomiarowe (rys.2) stanowi drugie ogniwo łańcucha diagnozowania. Efektem tego działania jest utworzenie zbioru symptomów (objawów).



Rys.2. Wnioskowanie pomiarowe

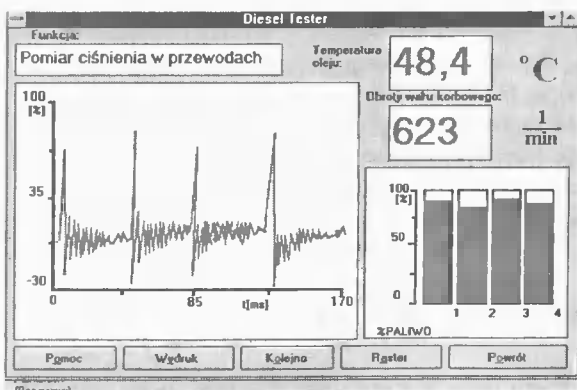
W dotychczasowych przyrządach diagnostycznych (m.in. również testerze silnika wysokoprężnego) wnioskowaniem pomiarowym zajmuje się operator, który wraz z testerem (przyrządem) tworzy pewien system. System jest w pełni zdalny, jeśli obszar realizowanych zadań, pokrywa się z obszarem zadań wymaganych [1]. Spełnienie tego warunku zależy między innymi od kwalifikacji operatora. To operator głównie analizuje wyniki pomiarów i interpretuje je w zależności od:

- ⇒ motywacji (warunków płacy, stanowiska pracy, konfliktu interesów itp.),
- ⇒ stanu psychofizycznego (samopoczucia, stanu zdrowia itp.),
- ⇒ wiedzy bazowej,
- ⇒ wiedzy aktualnej (o zadaniach, otoczeniu, stanie obiektu),
- ⇒ percepcji informacji bieżących (w tym diagnostycznych).

Operatorzy obsługujący urządzenia pomiarowe, które rejestrują kilka lub kilkanaście sygnałów, są po kilku godzinach pracy przeciążeni i tracą nad nimi panowanie. Ich wnioskowanie na podstawie pomiarów niekiedy może być całkowicie błędne, a ustalenie przyczyn na podstawie symptomów może okazać się nieekonomiczne lub niemożliwe.

Najlepiej ten problem przedstawia rys.3, na którym tester silnika wysokoprężnego prezentuje zmierzone przebiegi ciśnienia oleju napędowego w przewodach wtryskowych.

Która z części prezentowanego wykresu pozwoli nam zidentyfikować nieszczelny wtryskiwacz, niezdatny zaworek tłoczący czy nieszczelność na drodze: pompa wtryskowa - wtryskiwacz? Jak widzimy na przedstawionym przykładzie, tylko niektóre niesprawności mogą być trafnie rozpoznane, a możliwości układu tester - operator głównie zależą od kwalifikacji, doświadczenia operatora i możliwości pomiarowych testera.



Rys.3. Obraz ekranu monitora testera podczas pomiaru

Należy również zwrócić uwagę na inny, bardzo istotny element. Otóż, w początkowym etapie eksploatacji testera w przypadku serii błędnych diagnoz (subiektywnych wniosków interpretacji wyników) może nasilić się zjawisko niechęci do urządzenia, spowodowane złym stanem psychofizycznym operatora w początkowej fazie uczenia się jego użytkowania.

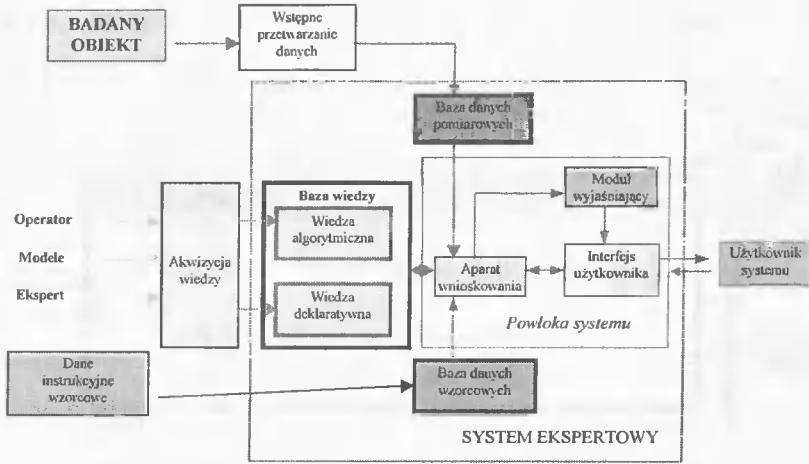
4. WNISKOWANIE POMIAROWE PRZY POMOCY SYSTEMU EKSPERTOWEGO

Wspomaganie wnioskowania pomiarowego przy wykorzystaniu systemu ekspertowego przedstawione zostało na rys.4. Wykorzystany do tego celu system ekspertowy będzie systemem hybrydowym, małym około 30 - 50 reguł („mini” system).

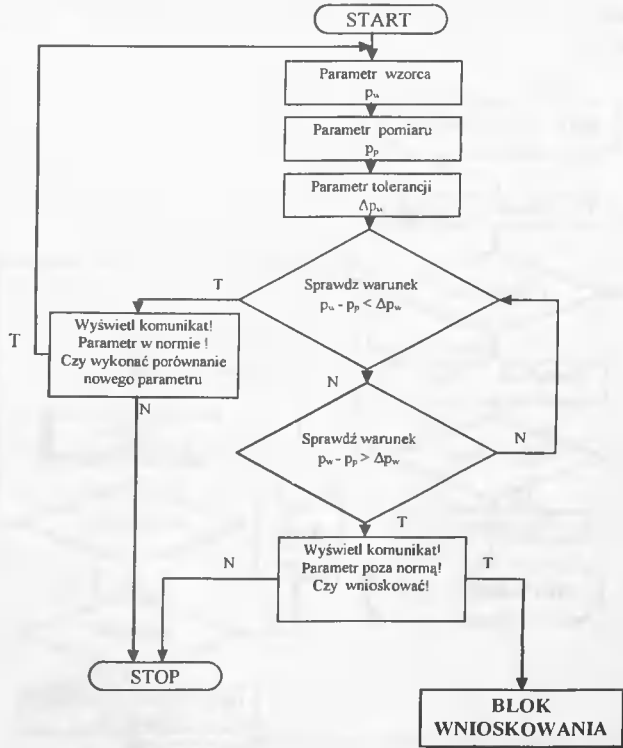
Funkcje operatora dotyczące wnioskowania na podstawie pomiarów przejął system ekspertowy, który do analizy, np. przebiegów ciśnienia w przewodach wtryskowych wykorzystuje sztuczną sieć neuronową.

W ogólnym przypadku problem stosowania sztucznych sieci neuronowych w diagnostyce uszkodzeń obiektów technicznych sprowadzony jest do budowy neuronowego klasyfikatora stanu obiektu na podstawie rozpoznawania obrazów jego stanu [5].

Wnioskowanie na podstawie pozostałych parametrów, takich jak: pomiar prędkości kątownego biegu jałowego i regulatorowych, pomiar dynamicznego kąta wyprzedzenia tłoczenia aparatury wtryskowej, pomiar przesunięcia fazowego tłoczenia paliwa do cylindrów, pomiar maksymalnego ciśnienia wtrysku i in. (szczegóły określa dokumentacja prototypu Testera silnika ZS [8] wykonanego w Katedrze Maszyn Roboczych i Pojazdów ATR na zlecenie KBB w ramach projektu badawczego), realizowane będzie przez system przy pomocy algorytmu - (rys.5).

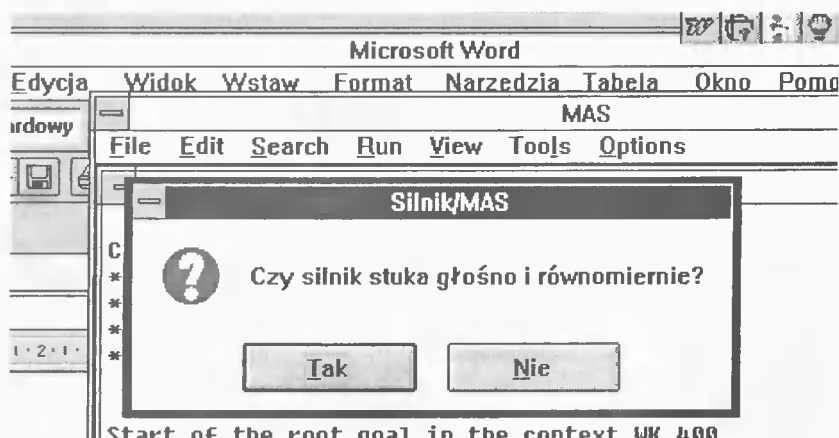


Rys.4. Architektura systemu ekspertowego wspomagającego diagnozowanie obiektu



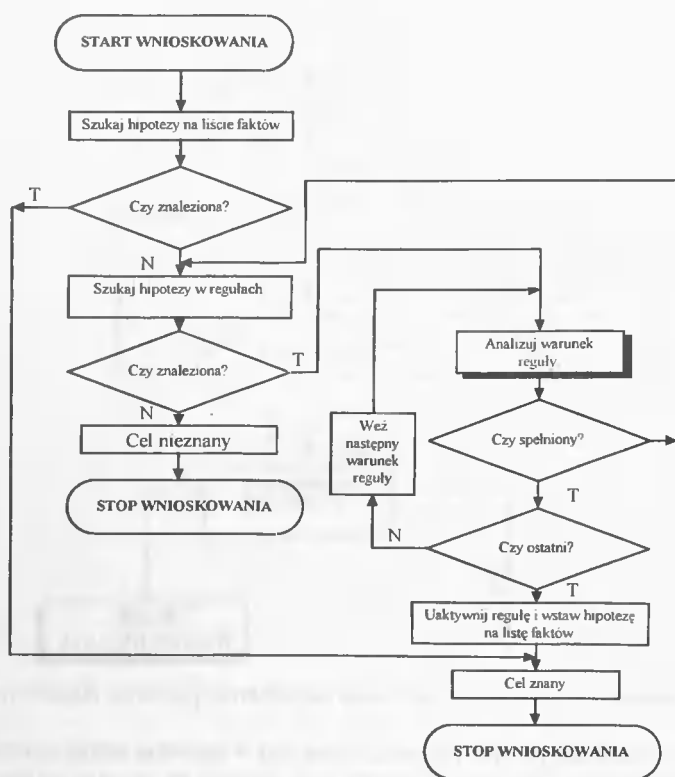
Rys.5. Uproszczony algorytm wnioskowania na podstawie pomiarów diagnostycznych

Przebieg pomiędzy pomiarami realizowane jest w systemie automatycznym lub ręcznym. Wnioskowanie kończy się z chwilą wyświetlenia na ekranie wniosków w postaci komunikatu (rys.6), na który odpowiada operator testera.



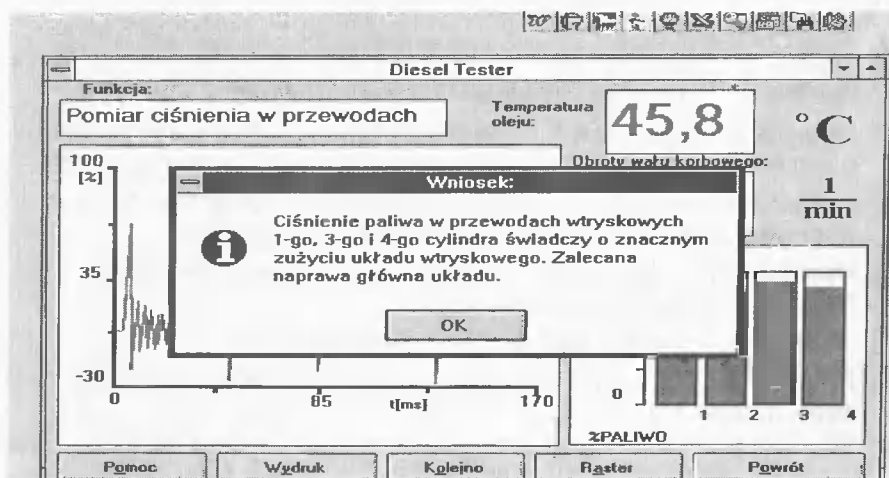
Rys.6. Przykładowy komunikat systemu podczas wnioskowania

W bloku wnioskowania realizowane jest wnioskowanie wg algorytmu przedstawionego na rysunku 7.



Rys.7. Algorytm wnioskowania realizowany przez aparat wnioskujący

Po zbadaniu odpowiedzi użytkownika na zadawane przez system pytania, generowany jest wniosek końcowy mówiący o stanie obiektu (rys.8). Wniosek, po wyprowadzeniu na drukarkę może być przedmiotem analiz podczas testowania systemu a w późniejszym okresie stanowi podstawę do podjęcia decyzji diagnostycznej [9].



Rys.8. Ekran monitora testera z wnioskiem dla operatora

5. WNIOSKI

Aby wyeliminować pewne subiektywne czynniki przy stawianiu diagnozy podczas wnioskowania, na różnych poziomach łańcucha przetwarzania informacji diagnostycznej należy konstruować różnego rodzaju przyrządy, testery pracujące w systemach mikroprocesorowych, wyposażać w mini systemy ekspertowe. Zastosowanie sztucznej inteligencji pozwoli już na etapie badania diagnostycznego eliminować błędne wnioski wpływające niekiedy znacząco na diagnozy objawowe, a następnie strukturalne i eksploatacyjne obiektów technicznych.

Tego typu rozwiązania mogą okazać się szczególnie przydatne tam, gdzie chodzi o pomiar i analizę różnego rodzaju sygnałów zmiennych w bardzo krótkim czasie (np. zmiany przebiegu ciśnienia w przewodach wtryskowych), złożonych obiektów technicznych, takich jak np. silnik wysokoprężny wielocylindrowy.

Konstruowanie przyrządów, urządzeń komunikujących się z operatorem (rys.6 i 8) w formie komunikatów (takie możliwości stworzyło środowisko Windows) może w niedalekiej przyszłości spowodować wzrost konkurencyjności tego typu urządzeń na rynku krajowym i zagranicznym.

LITERATURA

- [1] Będkowski L., Dąbrowski T.: Problemy diagnozowania w systemach antropotechnicznych. Materiały KDT 96, Gdańsk 1996.
- [2] Cholewa W.: Szkieletowy system doradczy MAS. Program główny. KPMK, Gliwice 1993.
- [3] Cholewa W.: Systemy doradcze w diagnostyce technicznej. Materiały z III Krajowej Konferencji „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów”. Gliwice 1996.
- [4] Chromiec J., Strzemieczna E.: Sztuczna inteligencja - Metody konstrukcji i analiz systemów ekspertowych. Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1994.
- [5] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D.: Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy i zastosowania. Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1994.
- [6] Moczulski W.: Bazy wiedzy diagnostycznych systemów doradczych. Kongres Diagnostyki Technicznej, Gdańsk 1996.
- [7] Mulawka J.: Systemy ekspertowe. WNT, Warszawa 1996.
- [8] Żółtowski B.: Diagnostyka silnika wysokoprężnego. Instytut Technologii Eksploatacji. Radom 1995.
- [9] Żółtowski B., Ćwik Z.: Leksykon Diagnostyki Technicznej. ATR, Bydgoszcz 1996.

ADVISORY SYSTEM IN DIAGNOSING INTERNAL COMBUSTION,
COMPRESSION-IGNITION ENGINE

Summary

The issue of estimating technological condition of internal combustion engine gathers special meaning mostly in using stage, in consideration of economical and ecological conditions. Appliances which are used nowadays and which diagnose condition of subjects such as compression – ignition engines, are limited only to the measurements. The interpretation of measurement's effects and conclusions which flow from this, mostly depend on the condition of appliance's operator. This article treats of a subject of diagnosing compression-ignition engine and initially shows the project of tester which uses artificial intelligence and which assists diagnostic operator's decision.

ANALITYCZNA OCENA CYKLU CIEPLNEGO W PROCESIE SPAWANIA W STREFIE WPLYWU CIEPŁA PRZY WYKORZYSTANIU RÓŻNYCH MODELI ŹRÓDEŁ CIEPŁA

*Eugeniusz Ranatowski, **Adam Poćwiardowski

*Wydział Mechaniczny ATR
Katedra Materiałoznawstwa i Technologii Metali
ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
**Telfa SA, Bydgoszcz

Efektywną metodą do szybkich obliczeń pól termicznych możemy uznać analityczne modelowanie połączone z numerycznymi obliczeniami. W niniejszym artykule przedstawiono liniową, analityczno - numeryczną metodę obliczeń. Podstawą obliczeń jest matematyczny, trójwymiarowy model źródła ciepła o charakterze uniwersalnym, pozwalający opisać również inne ich formy, poprzez jego transformację.

Obliczenia objęły płyty o dowolnej grubości wraz z uwzględnieniem wymiany ciepła na powierzchni ograniczającej. W pierwszej kolejności założono ruchome źródło o działaniu impulsowym, wywołując nieustalone pole ciepłne, a następnie sumowano ich oddziaływanie. W pracy przedstawiono również kilka analitycznych przykładów.

Słowa kluczowe: modelowanie analityczne, źródło ciepła, temperatura, pole ustalone i nieustalone, wymiana ciepła

1. WSTĘP

Współczesne metody spajania bazują na źródłach ciepła o różnym stopniu koncentracji strumienia energii i mocy. Efektywność ich wykorzystania jest uzależniona od umiejętności przewidywania skutków ich działania poprzez charakterystykę przestrzeni wymiarowej procesu: pól temperaturowych $T(x, y, z, t)$ i sprzężonych z nimi parametrów charakteryzujących cieplny cykl procesu spajania - czasu $t_{800 - 500^\circ}$, chwilowej szybkości chłodzenia w_T , bądź liczby Fourier'a (LF) itp. Przeprowadzenie analizy wymiarowej procesu spajania, wymaga opisu zachodzących wewnętrznych prawidłowości, obejmujących układ: źródło ciepła (ZC) - spoina (S) - strefa wpływu ciepła (SWC). Każdy z elementów w/w układu wymaga odrębnego podejścia i oceny z uwagi na zupełnie odmienny przebieg zjawisk fizycznych, zachodzących w elementach układu. Zjawiska fizyczne są bezpośrednio ze sobą sprzężone i na siebie oddziałują, nadając temu procesowi synergiczny charakter.

W obszarze SWC zachodzi głównie transport strumienia energii na sposób ciepła poprzez przewodzenie i może być opisany poprzez równanie różniczkowe cząstkowe Fourier'a - Kirchhoff'a (F - K).

W niniejszym opracowaniu skoncentrujemy swoją uwagę głównie na równaniu F - K, przyjmując jako podstawę rozważań rozwiązania analityczne. Cenną zaletą aplikacji metod analitycznych jest forma uzyskanych rozwiązań, cechująca się pewnym uogólnieniem i umożliwiającą analizę wymiarowa procesu. Do metod analitycznych zaliczamy również te metody, w których obliczenie wartości liczbowych funkcji wymaga pewnej obróbki numerycznej.

2. ANALITYCZNA OCENA PRZEPEŁYWU CIEPŁA W PŁYCIE O DOWOLNEJ GRUBOŚCI

Ogólną postać równania F - K w nieruchomym układzie współrzędnych można określić w postaci:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) - c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = -q(x_0, y_0, z_0, t), \quad (1)$$

gdzie:

$$q(x_0, y_0, z_0, t) = q_v$$

λ - współczynnik przewodzenia ciepła, J/cm K,

c_p - ciepło właściwe przy $p = \text{const}$, J/kg K,

ρ - gęstość, kg/cm³,

t - czas, s,

q_v - energia wydzielona na sposób ciepła w jednostce objętości w czasie, J/cm³ s,

T - temperatura, °C.

Rozwiązanie równania (1) dla modelu płyty o grubości g , powiązane jest z przyjęciem stosownych założeń i uproszczeń:

struktura spawanych materiałów jest jednorodna o izotopowych własnościach fizycznych,

- parametry fizyczne λ , c_p , ρ nie zależą od temperatury,
- pomijamy przemiany fazowe,
- źródło ciepła ma charakter trójwymiarowy,
- spełnione są następujące warunki początkowo - brzegowe.

$$T(x_0, y_0, z_0, t_0 = 0) = T_0 = 0, \quad (2a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_0} = 0; x_0 \rightarrow \infty; x_0 \rightarrow -\infty, \quad (2b)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y_0} = 0; y_0 \rightarrow \infty; y_0 \rightarrow -\infty, \quad (2c)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z_0} = \alpha_0 \cdot T \quad ; \quad z_0 = 0, \quad (2d)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z_0} = -\alpha_1 T \quad ; \quad z_0 = g, \quad (2e)$$

gdzie:

α_0 - współczynnik przyjmowania ciepła na powierzchni $z = 0$, $W/cm^2 K$,

α_1 - współczynnik przyjmowania ciepła na powierzchni $z = g$, $W/cm^2 K$.

W aspekcie przyjętych założeń parametr q_v , występujący w równaniu (1), oznacza objętościową wydajność źródła ciepła w działaniu chwilowym - impulsowym.

Z matematycznego punktu widzenia parametr q_v określa obraz modelu źródła ciepła, przy zachowaniu matematycznie - objętościowego zapisu a rozkład energii dostarczonej na sposób ciepła przez źródło, związany jest ze współrzędnymi punktów tej przestrzeni w określonym układzie współrzędnych.

W niniejszym opracowaniu za q_v przyjmujemy cylindryczno - potęgowo - normalne źródło ciepła (C - P - N), stosowane przez N.K. Gianga [1]:

$$q_v = \frac{k K_z Q}{\pi(1 - \exp(-K_z \cdot s))} e^{-k(x^2 + y^2) - K_z \cdot z} (1 - u(z - s)), \quad (3)$$

gdzie:

k - współczynnik koncentracji źródła ciepła, $1/cm^2$,

K_z - współczynnik potęgowy źródła ciepła, $1/cm$,

$u(\dots)$ - funkcja schodkowa Heaviside'a,

Q - ilość ciepła wydzielona w czasie sekundy (moc źródła), J/s ,

s - głębokość działania źródła ciepła, cm .

Jest to model, którego interpretacja geometryczna jest utrudniona, z uwagi na jego trójwymiarową postać. Wyrażenie $(1 - u(z - s))$ oznacza, że działanie źródła ciepła występuje na części grubości płyty, równej długości odcinka $(0, s)$. Ponadto model źródła ciepła według równania (3), zakłada gaussowski rozkład gęstości energii $k K_z Q / \pi(1 - \exp(-K_z \cdot s))$ w kierunku promieniowym oraz uwzględnia spadek energii o charakterze wykładniczym jako funkcji wymiaru z , co praktycznie wyraża człon równania (3) $\rightarrow \exp(-k(x^2 + y^2) - K_z \cdot z)$.

Analiza efektywnej penetracji w/w źródła ciepła pozwala również stwierdzić, iż powierzchnię o jednakowej wartości q_v dla źródła C - P - N wyraża zależność:

$$z = \frac{3}{K_z} - \frac{k}{K_z}(x^2 + y^2), \quad (4)$$

dla $z \leq s$.

Jest to równanie paraboloidy, która w praktyce ogranicza obszar oddziaływania efektywnego źródła ciepła. W zależności od wartości $3/K_Z = h$ określającej wysokość paraboloidy, będą one miały zróżnicowany kształt - bardziej lub mniej smukły. Dla granicznych przypadków przy $k \neq 0$ otrzymamy:

- dla $h = 3/K_Z \rightarrow \infty (K_Z \rightarrow 0)$ otrzymamy walec o wysokości s , czyli źródło ciepła o charakterze dysku,
- dla $h = 3/K_Z \rightarrow 0 (K_Z \rightarrow \infty, s \rightarrow 0)$ otrzymamy źródło ciepła płasko - kołowo-normalne.

Istnieje również możliwość transformacji modelu cylindryczno - potęgowo - normalnego źródła w liniowe lub odcinkowe źródło dla $K_Z \rightarrow 0, k \rightarrow \infty, s > 0, s \leq g$ bądź punktowe źródło dla $K_Z \rightarrow 0, k \rightarrow \infty, s \rightarrow 0$.

Przeprowadzona analiza zależności (3 i 4) wskazuje więc, iż poprzez korekcję wartości k, K_Z oraz s możemy nadać źródłu ciepła różne cechy, stosownie do odpowiedniej metody spawania.

Wobec powyższego, nadając źródłu ciepła charakter impulsowy, poprzez wprowadzenie dystrybucji Diraca $\delta(t)$:

$$q_v = \frac{k K_Z Q \delta(t)}{\pi(1 - \exp(-K_Z s))} (1 - u(z_0 - s)) \cdot \exp\left(-k(x_0^2 + y_0^2) - K_Z \cdot z_0\right), \quad (5)$$

a następnie wstawiając do równania (1) otrzymamy:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_0^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y_0^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z_0^2} + \frac{k K_Z Q \delta(t)}{\pi(1 - \exp(-K_Z s)) \lambda} (1 - u(z_0 - s)) \cdot \exp\left(-k(x_0^2 + y_0^2) - K_Z z_0\right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (6)$$

$$\text{gdzie: } \alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}.$$

Biorąc pod uwagę warunki początkowo - brzegowe (2a) ÷ (2e) oraz stosując metodę przekształceń całkowych, otrzymamy ocenę chwilowego pola temperatur od impulsu cieplnego w postaci:

$$T = \frac{Q \cdot K_Z \cdot k \cdot u(t)}{\pi \cdot c(1 - \exp(-K_Z \cdot s))(1 + 4\alpha \cdot t \cdot k)} \cdot \exp\left(\frac{k(x_0^2 + y_0^2)}{1 + 4\alpha \cdot t \cdot k}\right) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} B_i C_i D_i \exp\left(-\alpha \cdot r_i^2 \cdot (t - t')\right). \quad (7)$$

Stosując zasadę addytywności, sumaryczne pole temperatur od przesuującego się źródła wyraża zależność:

$$T(t) = \int_0^t d\Pi(t') \quad (8)$$

gdzie:

t' - czas towarzyszący przesuwowi źródła ciepła.

Zależność (8) - jako rezultat sumowania oddziaływań źródła chwilowego (impulsowego) na całej drodze przesuwu, stanowi postać wyjściową do otrzymania końcowych zależności w układzie ruchomym i nieruchomym współrzędnych.

W układzie współrzędnych nieruchomym, odległość między danym punktem $A(x_0, y_0, z_0)$ spawanej płyty a źródłem ciepła w punkcie O' , w chwili czasu t' wynosi:

$$O'A = \sqrt{(x_0 - v \cdot t')^2 + y_0^2 + z_0^2},$$

natomiast czas trwania procesu dla dowolnego punktu płyty po wygenerowaniu danego impulsu ciepła wynosi: $(t - t')$, co prowadzi do wyrażenia na pole temperatur dla poruszającego się źródła w układzie nieruchomym:

$$I(x_0, y_0, z_0, t) = \frac{q \cdot k \cdot K_Z}{\pi \cdot c \cdot (1 - \exp(-K_Z \cdot s))} \cdot \int_0^t \frac{u(t') \cdot dt'}{(1 + 4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - t'))} \cdot \exp\left\{-\frac{k \cdot ((x_0 - v \cdot t')^2 + y^2)}{4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - t') + 1}\right\} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} B_i \cdot C_i \cdot D_i \cdot \exp(-\alpha \cdot r_i \cdot (t - t')), \quad (9)$$

gdzie :

$$B_i = \cos(r_i \cdot z_0) + \frac{\alpha_0}{\lambda \cdot r_i} \sin(r_i \cdot z_0), \quad (10a)$$

$$C_i = \frac{2 \cdot r_i^2}{\left[\left(\frac{\alpha_0^2}{\lambda^2} + r_i^2\right) \cdot \left(g + \frac{\alpha_1 \cdot \lambda}{\alpha_1^2 + r_i^2 \cdot \lambda^2}\right) + \frac{\alpha_0}{\lambda}\right]}, \quad (10b)$$

$$D_i = \exp(-K_Z \cdot s) \cdot \frac{(-K_Z \cdot \cos(r_i \cdot s) \lambda \cdot r_i + r_i^2 \cdot \sin(r_i \cdot s) \lambda - \alpha_0 \cdot r_i \cdot \cos(r_i \cdot s) - \alpha_0 \cdot K_Z \cdot \sin(r_i \cdot s))}{(K_Z^2 + r_i^2) \lambda \cdot r_i} + \frac{K_Z \cdot \lambda + \alpha_0}{(K_Z^2 + r_i^2) \cdot \lambda}, \quad (10c)$$

$r_1, r_2, r_3 \dots (r_i)$ - pierwiastki równania:

$$\operatorname{ctg}(r_i \cdot g) = \frac{\lambda^2 \cdot r_i^2 - \alpha_0 \cdot \alpha_1}{\lambda \cdot r_i (\alpha_0 + \alpha_1)}. \quad (10d)$$

Szczególnie przydatna staje się analiza pól temperaturowych w ruchomym układzie współrzędnych związanym z przesuwającym się źródłem ciepła: $x = x_0 - vt$, $y = y_0$, $z = z_0$. Przekształcając zależność (9) otrzymamy wówczas:

$$T(x, y, z, t) = \frac{q \cdot k \cdot K_z}{\pi \cdot c \cdot (1 - \exp(-K_z \cdot s))} \cdot \int_0^t \frac{u(t') \cdot dt'}{(1 + 4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - t'))} \cdot \exp\left(-\frac{k \cdot \left((x + v \cdot (t - t'))^2 + y^2\right)}{4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - t') + 1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} B_i \cdot C_i \cdot D_i \cdot \exp(-\alpha \cdot r_i^2 \cdot (t - t')), \quad (11)$$

gdzie:

$$B_i = \cos(r_i \cdot z) + \frac{\alpha_0}{\lambda \cdot r_i} \cdot \sin(r_i \cdot z), \quad (12a)$$

natomiast wartości C_i , D_i i pierwiastków r_i są analogiczne jak w układzie ruchomym (10b, 10c, 10d).

Zależności analityczne (9) i (11) są merytorycznie zbieżne z rozwiązaniem N.K. Gianga [1].

Przedstawiona forma rozwiązania jest oczywiście zbyt trudna i pracochłonna do bezpośrednich obliczeń analitycznych, ale i nieodpowiednia do obliczeń komputerowych. Analiza pól temperaturowych w czasie, stanie się jednak możliwa przy pewnej dyskretyzacji tych równań, umożliwiającej kalkulację komputerową z określoną dokładnością.

Założono, iż ciepło jest wprowadzane przez określony, mały przedział czasowy Δt , a nie impulsowo, gdzie $\Delta t \rightarrow 0$. W związku z tym oddziaływania źródeł ciepła na drodze ich przesuwu, sumujemy w punktach oddalonych od siebie o $\Delta x = v\Delta t$ Wobec tego $t' = j \cdot \Delta t$ ($j = 1, 2, 3 \dots n$).

Ponadto zmieniono całkę z chwilowych pól temperatur od źródeł impulsowych na sumę pól temperaturowych, powstających w odstępach czasu równych Δt . Liczba składników sumy zależy od czasu badania przebiegu cyklu cieplnego. Po przekształceniu zależności analitycznych (9) i (11) uzyskujemy zależności użyteczne do obliczeń numerycznych.

W układzie nieruchomym zależność (9) przyjmuje postać:

$$T(x_0, y_0, z_0, t) = \sum_{j=1}^n \text{if} \left\{ t < (j-1) \cdot \Delta t, 0, \frac{q \cdot k \cdot K_z \cdot \Delta t}{\pi \cdot (1 - \exp(-K_z \cdot s)) \cdot c \cdot (1 + 4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - (j-1) \Delta t))} \right. \\ \cdot \exp \left[-k \cdot \frac{(x_0 - (j-1)v \cdot \Delta t)^2 + y_0^2}{(1 + 4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - (j-1) \Delta t))} \right] \cdot \sum_{i=1}^m \left(D_i \cdot (\cos(r_i \cdot z_0) + \frac{\alpha_0}{\lambda \cdot r_i} \cdot \sin(r_i \cdot z_0)) \right) \cdot \\ \left. C_i \cdot \exp \left[\alpha \cdot r_i^2 \cdot (t - (j-1) \cdot \Delta t) \right] \right\}. \quad (13)$$

W układzie ruchomym zależność (11) przyjmuje postać:

$$T(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^n \text{if} \left\{ t < (j-1) \cdot \Delta t, 0, \frac{q \cdot k \cdot K_z \cdot \Delta t}{\pi \cdot (1 - \exp(-K_z \cdot s)) \cdot c \cdot (1 + 4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - (j-1) \cdot \Delta t))} \right. \\ \cdot \exp \left[-k \cdot \frac{(x + v \cdot t - (j-1) \cdot v \cdot \Delta t)^2 + y^2}{1 + 4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - (j-1) \Delta t)} \right] \cdot \sum_{i=1}^m D_i \cdot \left(\cos(r_i \cdot z) + \frac{\alpha_0}{\lambda \cdot r_i} \cdot \sin(r_i \cdot z) \right) \cdot \\ \left. C_i \cdot \exp \left[\alpha \cdot r_i^2 \cdot (t - (j-1) \cdot \Delta t) \right] \right\}. \quad (14)$$

Zależności (13) i (14) zawierają funkcję IF, której struktura jest następująca: if (warunek, wyrażenie 1, wyrażenie 2), co praktycznie oznacza, że proces sumowania odbywa się dla kolejnych impulsów dopiero od momentu generowania danego impulsu.

3. PRZYKŁADY OBLICZENIOWE OCENY CYKLU CIEPLNEGO PRZY SPAWANIU PŁYTY

Rozważmy analizę cyklu cieplnego, zachodzącego przy spawaniu płyty i stosowaniu następujących parametrów:

$q = 4300 \text{ W}$;	$c = 5,22 \text{ J/cm}^3\text{K}$
$g = 1,2 \text{ cm}$;	$\lambda = 0,4187 \text{ W/cm K}$
$\alpha_0 = 0,02 \text{ W/cm}^2\text{K}$;	$\alpha = 0,08 \text{ cm}^2/\text{s}$
$\alpha_1 = 0,01 \text{ W/cm}^2\text{K}$;	$v = 0,3 \text{ cm/s}$

przy zastosowaniu modelu:

- cylindryczno - potęgowo - normalnego źródła ciepła dla $s = 0,5 \text{ cm}$; $k = 12 \text{ 1/cm}^2$;
- $K_z = 6 \text{ 1/cm}$,
- kołowo - normalnego źródła ciepła dla $s = 1,2 \text{ cm}$; $k = 12 \text{ 1/cm}^2$; $K_z = 0,0001 \text{ 1/cm}$,
- liniowego źródła ciepła dla $s = 1,2 \text{ cm}$; $k = 120000 \text{ 1/cm}^2$; $K_z = 0,0001 \text{ 1/cm}$,
- punktowego źródła ciepła dla $s = 0,0001 \text{ cm}$; $k = 120000 \text{ 1/cm}^2$; $K_z = 0,0001 \text{ 1/cm}$.

Dwa pierwsze modele źródeł ciepła odzwierciedlają różne formy wykorzystania źródeł ciepła o niskiej i średniej koncentracji energii, np w łuku elektrycznym - od metody GTA do strumienia plazmy. Trzeci model odzwierciedla sytuację, opartą na wykorzystaniu wysokoskoncentrowanych źródeł ciepła typu: laser, wiązka elektronów. Czwarty model ma charakter uniwersalny i został wprowadzony przez N.N. Rykalina.

Ma on zasadniczo znaczenie historyczne i wprowadzono go w niniejszym opracowaniu w celach porównawczych. Praktycznie może on odzwierciedlać jedynie sytuację, przy zastosowaniu lasera, pracującego w zakresie fal ultrafioletowych lub o zbliżonej długości o działaniu powierzchniowym - w innych przypadkach jest zbyt dużym uproszczeniem.

Ocena rozkładu temperatur wg (11) wymaga w pierwszej kolejności ustalenia wartości dodatnich pierwiastków r_i , otrzymanych w wyniku rozwiązania równania przestępnego (10d) a następnie obliczenia wartości stałych D_i , C_i według (10b), (10c). Obliczenia wykonano dla $j_{\max} = 1200$ oraz $i_{\max} = 50$. Z uwagi na podstawowe znaczenie określenia pierwiastków r_i w ocenie $T(x, y, z, t)$ i $T(x_0, y_0, z_0, t)$, poniżej przedstawiono algorytm postępowania w rozwiązaniu równania (10d) oraz zestawiono kilka wartości pierwiastków w tabeli 1 wraz z oceną dokładności rozwiązania.

Tabela 1. Zestawienie kilku pierwiastków $i = 1 \dots 18$

i	r_i	spr_i
1	0.243196731	$7.413876353 \cdot 10^{-7}$
2	2.640600093	0.006029821
3	5.247365828	0.00304129
4	7.861576417	0.002025335
5	10.477674075	0.001519965
6	13.094529159	0.001215953
7	15.711763491	0.001015506
8	18.329214695	$8.687979746 \cdot 10^{-4}$
9	20.946801502	$7.601360707 \cdot 10^{-4}$
10	23.564478734	$6.756906791 \cdot 10^{-4}$
11	26.182219277	$6.101602102 \cdot 10^{-4}$
12	28.800005869	$5.531905061 \cdot 10^{-4}$
13	31.417827002	$5.068467792 \cdot 10^{-4}$
14	34.035674707	$4.678223348 \cdot 10^{-4}$
15	36.65354329	$4.344021883 \cdot 10^{-4}$
16	39.271428577	$4.054430088 \cdot 10^{-4}$
17	41.889327436	$3.841181131 \cdot 10^{-4}$
18	44.507237473	$3.590633207 \cdot 10^{-4}$

Algorytm - ocena r_i według (10d).

threshold = 0,0000000001

$\lambda = 0,4187$ $\alpha_0 = a = 0,02$ $\alpha_1 = b = 0,01$ $g = 1,2$ last = 100 $i = 1..last$

$r_i = n \leftarrow$ threshold

$$\text{if } \text{root} \left[\cot(n \cdot g) - \frac{\lambda^2 \cdot n^2 - a \cdot b}{(a + b) \cdot (\lambda \cdot n)}, n \right] \text{ if } i = 1 > \text{threshold}$$

$$\text{root} \left[\cot(n \cdot g) - \frac{(\lambda \cdot n)}{a + b} - (i - 1) \cdot \left(\frac{\pi}{g} \cdot \frac{\lambda}{a + b} \right), n \right] \text{ if } 1 < i \leq \text{last}$$

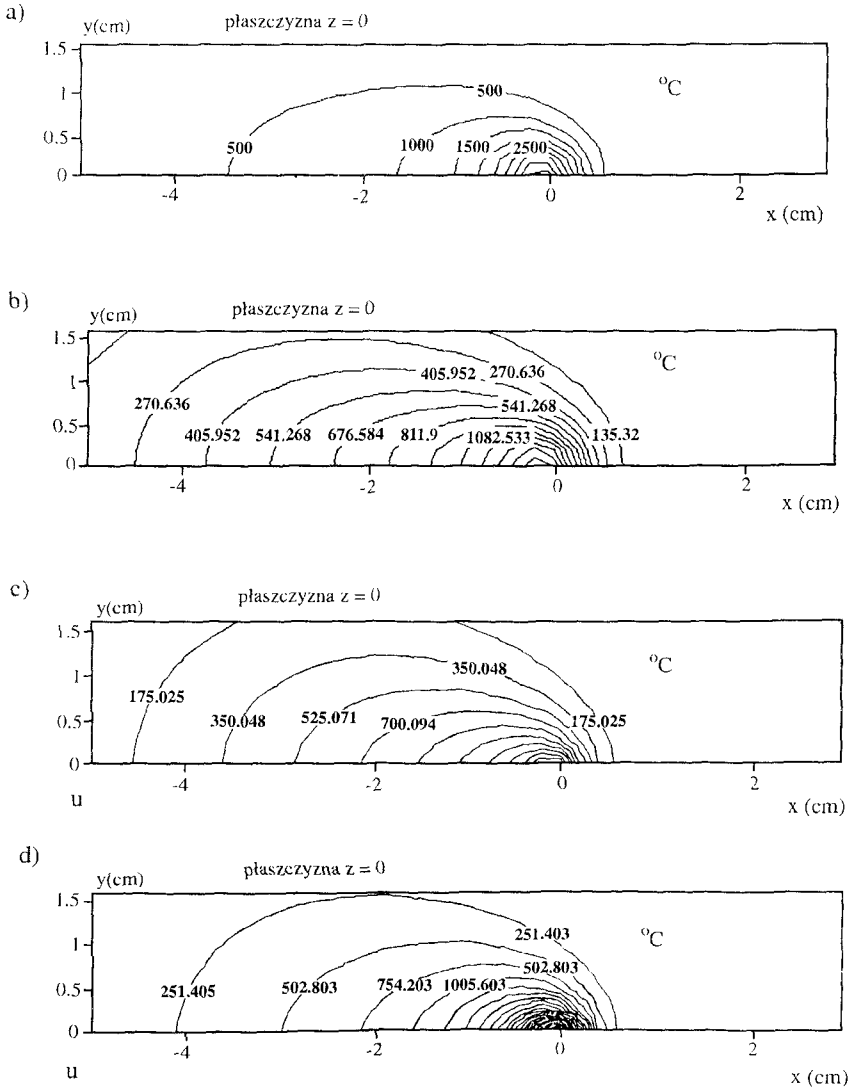
$$\text{root} \left[\cot(n \cdot g) - \frac{\lambda^2 \cdot n^2 - a \cdot b}{(a + b) \cdot (\lambda \cdot n)}, n \right] \text{ if } i = 1$$

$$\text{root} \left[\cot(n \cdot g) - \frac{(\lambda \cdot n)}{(a + b)} - (i - 1) \cdot \left(\frac{\pi}{g} \cdot \frac{\lambda}{a + b} \right), n \right] + (i - 1) \cdot \frac{\pi}{g} \text{ if } 1 < i \leq \text{last}$$

$$\text{threshold} + (i - 1) \cdot \frac{\pi}{g} \text{ otherwise}$$

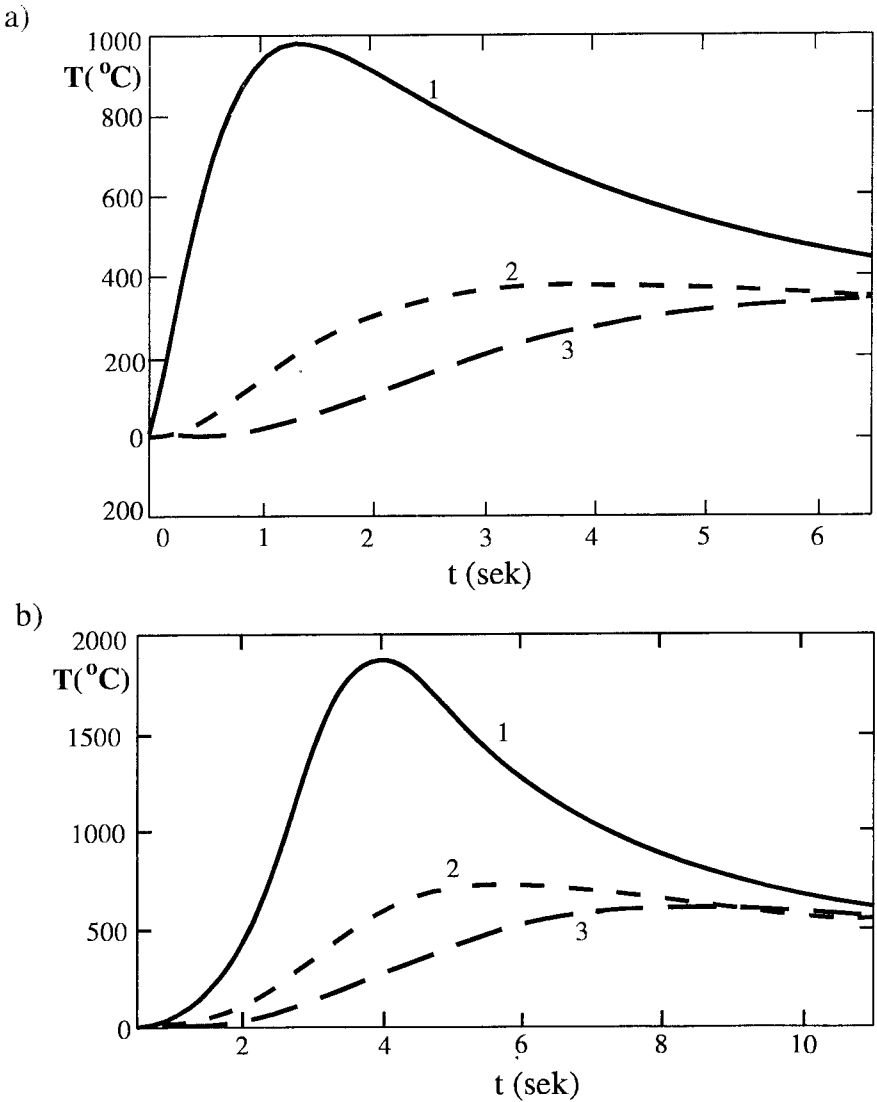
$$\text{spr}_i = \cot(r_i \cdot g) - \frac{\lambda^2 \cdot (r_i)^2 - a \cdot b}{(a + b) \cdot [\lambda \cdot (r_i)]}$$

Na rysunku 1 przedstawiono - w układzie ruchomym rozkłady izoterm w płaszczyźnie x, y dla $z = 0$ dla źródeł ciepła o tej samej mocy, ale różnej postaci i głębokości penetracji płyty, uwidaczniając ich wpływ na rozkład temperatur.



Rys. 1. Ustalone pola temperatur w płaszczyźnie $z = 0$ dla źródeł ciepła o mocy $q = 4300$ W:
 a) cylindryczno - potęgowo - normalnego, $k = 12$ $1/cm^2$, $K_z = 6$ $1/cm$, $s = 0.5$ cm,
 b) kołowo - normalnego, $k = 12$ $1/cm^2$, $K_z = 0.0001$ $1/cm$, $s = 1.2$ cm,
 c) liniowego, $k = 120000$ $1/cm^2$, $K_z = 0.0001$ $1/cm$, $s = 1.2$ cm,
 d) punktowego, $k = 120000$ $1/cm^2$, $K_z = 0.0001$ $1/cm$, $s = 0.0001$ cm

Ponadto na rysunku 2 przedstawiono - w układzie nieruchomym - dla cylindryczno - potęgowo - normalnego źródła ciepła zmianę temperatury T w funkcji czasu t , w przekroju $x = 0$ i $x = 1$ dla kilku różnych punktów płyty spawanej.



Rys.2. Przebieg zmiany temperatury $T(t)$ przy działaniu cylindryczno - potęgowo - normalnego źródła ciepła w przekroju:

a) $x = 0$ i pkt. 1 (0, 0, 0), 2 (0, 0.2, 0.2), 3 (0, 0.5, 0.6), 4 (0, 0, 1.2)

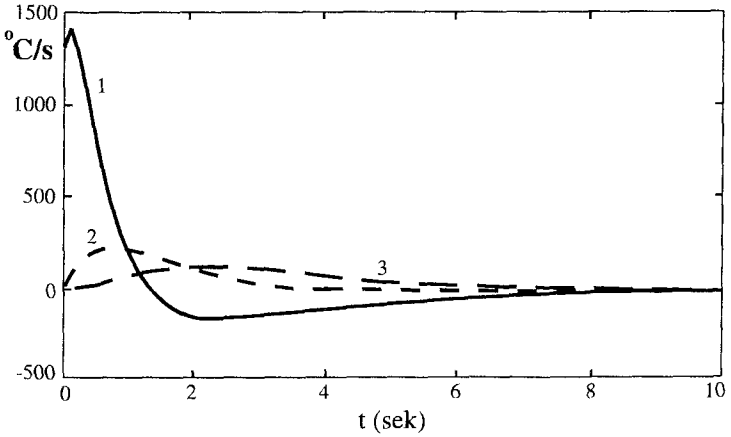
b) $x = 1$ i pkt. 1 (1, 0, 0), 2 (1, 0.2, 0.2), 3 (1, 0.5, 0.6), 4 (1, 0, 1.2) i pozostałych parametrów jak na rysunku 1.

Rysunek 3 obrazuje zmianę chwilowej szybkości chłodzenia dla tych samych punktów w przekroju $x_0 = 0$ i $x_0 = 1$.

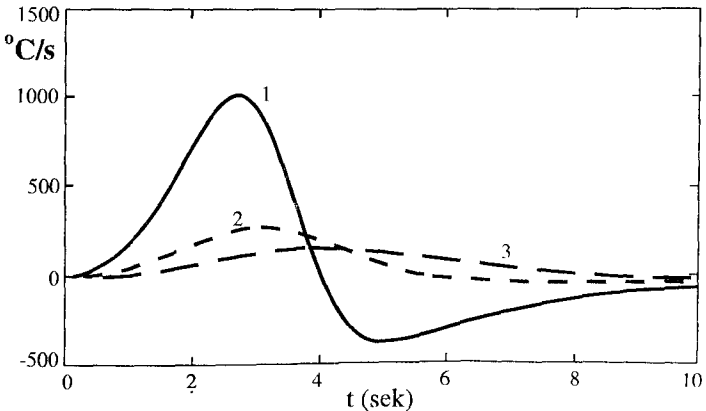
Przedstawione przykłady, na rysunkach 1,2 i 3, wskazują na możliwość znacznego urealnienia obliczeń cyklu cieplnego, przy wykorzystaniu bardzo przejrzystego opisu analitycznego w SWC i wprowadzeniu do obliczeń:

- modeli źródeł ciepła, dobrze odzwierciedlających warunki spawania,
- wymiany ciepła na powierzchniach ograniczających płytę,
- i oceny zjawisk termicznych dla płyt o dowolnej grubości.

a)



b)



Rys.3. Wykresy zmiany chwilowej prędkości chłodzenia w_T , °C/s, dla przebiegu $T(t)$ jak na rysunku 2

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiona w niniejszym opracowaniu ocena rozkładu temperatury $T(x, y, z, t)$ oraz innych parametrów charakteryzujących cieplny cykl w SWC przy spawaniu płyt o dowolnej grubości z wymianą ciepła na powierzchniach ograniczających płytę wskazuje na możliwość:

- uzyskania efektywnych rozwiązań poprzez połączenie czysto analitycznych rozwiązań z metodami numerycznymi,
- zastosowanie różnych modeli źródeł ciepła, również o charakterze przestrzennym,
- realizacji obliczeń na stosunkowo prostym i łatwo dostępnym sprzęcie komputerowym, np. PC - 486.

Czyni to analityczne rozwiązania konkurencyjnymi w stosunku do metod czysto numerycznych, opartych np. o metodę MES oraz użytecznymi do stosowania w praktyce inżynierskiej i budowie systemów komputerowych. Stanie się to w pełni realne, po wprowadzeniu do wyżej wymienionych obliczeń zjawisk nieliniowych, wynikających z uzależnienia od temperatury T , parametrów fizycznych $\lambda(T)$, $\alpha(T)$, $\rho(T)$, $c(T)$, co wydaje się możliwe przy wykorzystaniu metod analityczno - numerycznych.

LITERATURA

- [1] Giang N.K.: Analityczny model do określania ustalonych pól temperatur i metoda klasyfikacji ciał w cieplnych procesach spawalniczych. Praca doktorska. Politechnika Gdańska, 1986.
- [2] Poćwiartowski A.: Ocena wpływu mocy i kształtu spawalniczych źródeł ciepła na przebieg cyklu cieplnego ze wspomaganie komputerowym. Wydział Mechaniczny ATR w Bydgoszczy. Praca magisterska, 1994.
- [3] Ranatowski E.: Analityczna ocena procesów termicznych w procesie spawania. Zeszyty Naukowe ATR w Bydgoszczy, Mechanika 38, 1995.

AN ANALYTICAL EVALUATION OF THE THERMAL CYCLE IN HEAT AFFECTED ZONE DURING WELDING AT USED DIFFERENT HEAT SOURCE MODELS

Summary

A method that effectively joins analytic mathematical modelling with numerical calculation seems to be the idea for fast computing thermal fields.

In this article a linear, analytic, numerically computed method would be presented. The basis of this method is mathematical, universal, three dimensional heat source model that can successfully describe all necessary welding heat sources.

For the plate with optional thickness, the changeable radiative heat transfer on both surface is taken under consideration. It is assumed that moving heat source, during a very short period of time, generates impulse of energy which induces an instantaneous thermal field plate area. These fields are being fluently summed up giving resultant thermal field. There also was made some analytical examples.

MIKROGEOMETRIA POWIERZCHNI PO OBRÓBCE METODAMI WSPOMAGANYMI PRĄDEM ELEKTRYCZNYM

Michał Styp-Rekowski

Wydział Mechaniczny ATR
Katedra Obrabiarek i Robotów
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz

W artykule przedstawiono syntezę wiadomości literaturowych dotyczących chropowatości powierzchni po obróbce metodami wspomaganymi prądem elektrycznym. Zestawiono także najistotniejsze zdaniem autora czynniki wpływające na uzyskiwaną chropowatość. Zebrane informacje mogą służyć jako pomoc przy doborze obróbki, szczególnie materiałów trudno obrabialnych.

Słowa kluczowe: obróbki erozyjne, chropowatość

1. WPROWADZENIE

Postęp techniczny obserwowany w dziedzinie inżynierii materiałowej wymusza wręcz konieczność poszukiwania coraz to lepszych metod obróbki tworzyw stosowanych na elementy współczesnych maszyn. Z jednej strony prowadzi to do doskonalenia metod tradycyjnych, z drugiej zaś - do opracowywania nowych, często niekonwencjonalnych metod umożliwiających obróbkę tworzyw nowych lub uznawanych dotychczas za nieobrabbialne bądź trudno obrabialne. Do tych drugich zaliczyć można między innymi wspomagane prądem elektrycznym metody erozyjne (EM - Erosive Machining), wśród których wyróżnia się:

- obróbkę elektroerozyjną (EDM - Electro-Discharge Machining);
- obróbkę elektrochemiczną (ECM - Electro-Chemical Machining);
- obróbkę laserową (LBM - Laser Beam Machining);
- obróbkę anodowo-mechaniczną (AMM - Anode-Mechanical Machining);
- obróbkę elektronową (EBM - Electron Beam Machining).

Opracowuje się także odmiany powyższych metod rozszerzające dotychczasowe lub stwarzające nowe możliwości technologiczne, na przykład:

- impulsowa obróbka elektrochemiczna (PECM - Pulse Electro-Chemical Machining);
- obróbkę elektrochemiczno-erozyjną (ECDM - Electro-Chemical-Discharge Machining);

albo stanowiące połączenia metod niekonwencjonalnych z tradycyjnymi, na przykład:

- obróbka erozyjno-mechaniczna elektrodą szczotkową (BEDMM - Brush Electro-Discharge Mechanical Machining);
- szlifowanie elektrochemiczne (ECG - Electro-Chemical Grinding);

- honowanie elektrochemiczne (ECH - Electro-Chemical Honing);
- frezowanie elektrochemiczne (ECM-M Electro-Chemical Mill Machining).

Wśród parametrów charakteryzujących poszczególne metody oraz ich odmiany najistotniejszymi są niewątpliwie: wydajność obróbki, jej dokładność, a także energochłonność. Ze względu na przeznaczenie elementów wytwarzanych za pomocą opisanych wyżej metod istotna jest także chropowatość obrabianych powierzchni roboczych. W niniejszej pracy podjęto próbę zestawienia informacji literaturowych dotyczących chropowatości uzyskiwanych za pomocą obróbek uznawanych za nietradycyjne oraz czynników w istotny sposób wpływających na rezultaty obróbki w aspekcie stanu powierzchni elementów.

2. CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI UZYSKIWANA RÓŻNYMI METODAMI OBRÓBKII WSPOMAGANEJ PRĄDEM ELEKTRYCZNYM

Jak już wcześniej stwierdzono, jednym z istotniejszych parametrów mających wpływ na użytkowe cechy elementów jest chropowatość ich powierzchni roboczych. Spośród wielu istniejących parametrów opisujących chropowatość powierzchni [12] do opisanego stanu powierzchni po obróbkach erozyjnych używa się najczęściej R_a . Dzięki szeroko prowadzonym badaniom o charakterze głównie technologicznym, lecz także i konstrukcyjnym, metodami EM uzyskuje się satysfakcjonujące już dokładności obróbki, jak również i chropowatości.

Zestawione poniżej wartości parametrów chropowatości powierzchni uzyskanych za pomocą różnego rodzaju obróbek erozyjnych i ich odmian, pozwalają jedynie na orientacyjne ich porównanie, gdyż warunki badań opublikowanych w poszczególnych źródłach różniły się między sobą, czasami nawet znacząco.

2.1. Obróbka elektroerozyjna (EDM)

Liczne publikacje dotyczące zagadnień związanych z tą metodą obróbki zawierają wartości R_a uzyskane na obrabianych powierzchniach. Na ich podstawie można stwierdzić, że bez względu na odmianę tej metody uzyskuje się stosunkowo duże wartości tego parametru. Najmniejsze wartości R_a uzyskano przy polerowaniu EDM: $R_a = 0,2 \div 1,5 \mu\text{m}$ [20] i drążeniu otworów: $R_a \geq 0,63 \mu\text{m}$ [4]. W pozostałych opisanych odmianach obróbki uzyskiwano chropowatości w zakresach;

$R_a = 2,5 \div 4,0 \mu\text{m}$ dla drążenia wykańczającego [19];

$R_a = 2,5 \div 3,2 \mu\text{m}$ dla tuszowania [2];

$R_a = 1,16 \div 3,29 \mu\text{m}$ dla drążenia [15];

$R_a = 2,5 \div 18,0 \mu\text{m}$ dla drążenia [22].

Pomimo stosunkowo dużych (w porównaniu do innych metod) uzyskiwanych tą metodą chropowatości, dzięki niektórym swoim cechom - głównie dokładności, jest to często jedyna możliwa do zastosowania metoda obróbki. Inne jej cechy (np. wprowadzanie do warstwy wierzchniej naprężeń rozciągających) powodują jednak, że niezbędne jest zastosowanie po niej innych rodzajów obróbki, np. ECM.

2.2. Obróbka elektrochemiczna (ECM)

Obróbka elektrochemiczna (ECM) na obecnym etapie jej opanowania pozwala na uzyskiwanie dokładności mniejszych niż EDM, lecz uzyskiwane chropowatości obrabianych powierzchni generalnie są mniejsze niż w przypadku EDM. Przy zastosowaniu różnych odmian ECM uzyskiwano następujące wartości parametru R_a :

$R_a = 0,1 \div 0,62 \mu\text{m}$ dla polerowania [11];

$R_a = 0,16 \div 0,64 \mu\text{m}$ dla gładzenia [8, 18];

$R_a = 0,16 \div 0,64 \mu\text{m}$ dla frezowania [5].

Zdecydowanie większe chropowatości uzyskano przy drażeniu otworów, przy którym parametr R_a był w zakresie $1,0 \div 3,0 \mu\text{m}$ [1,17].

Impulsowa odmiana obróbki elektrochemicznej (PECM) umożliwiła uzyskanie chropowatości już od $R_a = 0,05 \mu\text{m}$ jednak w większości przypadków uzyskiwano chropowatości w zakresie: $R_a = 0,1 \div 2,5 \mu\text{m}$ [9, 21]. Charakteryzuje się ona także największą (ok. 10x większą od procesu ciągłego [6]) dokładnością spośród tego rodzaju obróbek.

Połączenie obróbki ECM z tradycyjną obróbką ścierną (ECG) nie wprowadza istotnych zmian z punktu widzenia uzyskiwanych chropowatości. W opisanych w literaturze przykładach uzyskano poniższe wartości parametru R_a :

$R_a = 0,1 \div 0,2 \mu\text{m}$ dla honowania [3];

$R_a = 0,2 \div 3,0 \mu\text{m}$ dla dogładzania [7];

$R_a = 0,54 \div 0,90 \mu\text{m}$ dla szlifowania [16].

Różnica pomiędzy "czystą" ECM a jej połączeniem z obróbką ścierną polega głównie na różnicy w strukturze powierzchni.

2.3. Obróbka laserowa (LBM)

Informacji dotyczących chropowatości powierzchni obrabianych laserowo jest zdecydowanie mniej niż dotyczących obróbek opisanych wyżej. W pracy [10] przedstawiono badania dotyczące przecinania laserowego, przy którym przecięte powierzchnie miały chropowatość w zakresie $R_a = 7,0 \div 10,0 \mu\text{m}$. Są to wartości o rząd większe niż w przypadku obróbki ECM, lecz charakter opisywanej obróbki, czyli przecinania, nie wymaga na ogół mniejszych wartości tego parametru.

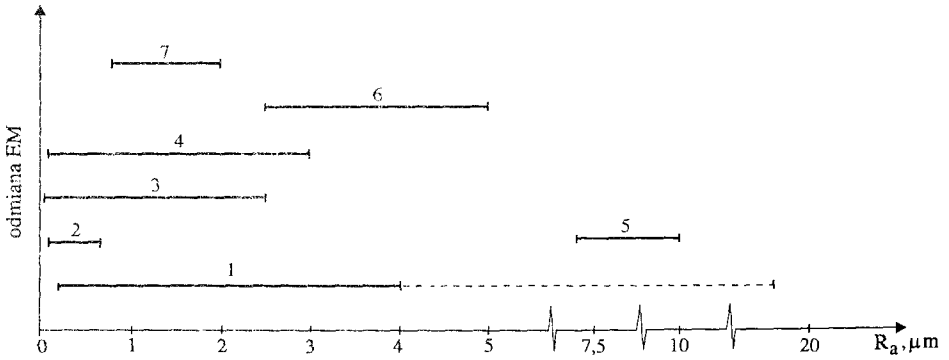
2.4. Obróbka anodowo-mechaniczna (AMM)

Obróbka anodowa-mechaniczna (AMM) zwana także niekiedy ze względu na charakter obróbki erozyjnej - obróbką elektrochemiczno-elektroerozyjną (ECDM) dotyczy również głównie przecinania. Z tego też względu, podobnie jak w przypadku obróbki LBM, nie jest wymagana mała chropowatość powierzchni przecinanych. Uzyskiwana chropowatość o $R_a = 2,5 \div 5,0 \mu\text{m}$ [14] spełnia te wymagania w zupełności.

2.5. Obróbka erozyjno-mechaniczna (BEDMM)

Ten rodzaj obróbki stanowi również szczególną odmianę połączenia obróbki elektrochemicznej, elektroerozyjnej i mechanicznej. Dzięki temu posiada ona cechy wszystkich trzech obróbek jednak ze względu na istniejące interakcje pomiędzy poszczególnymi procesami niektóre z tych cech ulegają wzmocnieniu, zaś inne - osłabieniu. Metodą tą można uzyskać powierzchnie charakteryzujące się parametrem $R_a = 0,8 \div 2,0 \mu\text{m}$ [13].

Zestawienie zakresów chropowatości możliwych do uzyskania omówionymi wyżej obróbkami wspomagany prądem elektrycznym przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Chropowatości powierzchni możliwe do uzyskania różnymi metodami obróbki wspomaganej prądem elektrycznym: 1-EDM, 2-ECM, 3-PECM, 4-ECG, 5-LBM, 6-AMM, 7-BEDMM

Z przytoczonej powyżej syntezy, a także z rysunku 1 wynika, że większością z przedstawionych metod możliwe jest uzyskanie powierzchni o parametrze chropowatości $R_a < 1,0 \mu\text{m}$.

3. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI OBROBIONYCH EROZYJNIE

W literaturze prezentującej badania dotyczące obróbek wspomaganych prądem elektrycznym podano wiele czynników, w większym lub mniejszym stopniu wpływających na efekt obróbki, w tym także w zakresie uzyskiwanych chropowatości. Omówione w rozdziale 2 rodzaje obróbek erozyjnych różnią się między sobą, niekiedy nawet całkowicie. Rozpatrując je w aspekcie skutków jakie wywołują, można wybrać pewną grupę czynników wspólnych dla wszystkich lub części z przedstawionych metod, co powoduje, że porównanie ich, mimo wspomnianych wyżej różnic, jest możliwe. Czynniki te można podzielić na trzy zasadnicze grupy:

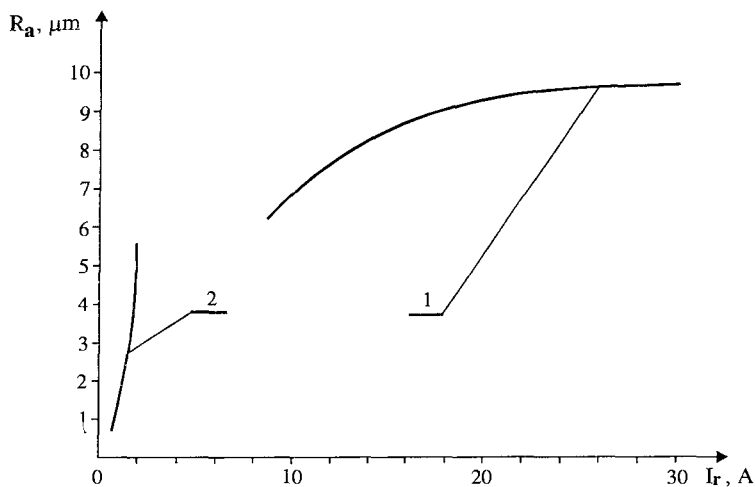
- technologiczne;
- konstrukcyjne;
- inne.

Poniziej opisano niektóre z nich, uznane przez autora za najistotniejsze.

3.1. Czynniki technologiczne

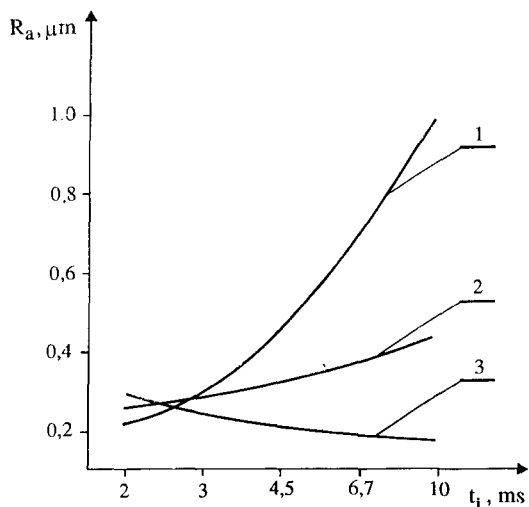
Jednym z podstawowych czynników technologicznych mających wpływ na stan obrobionej powierzchni jest natężenie i napięcie prądu technologicznego a także pochodna tego pierwszego, czyli gęstość prądu. Dotyczy to wszystkich omawianych rodzajów obróbek erozyjnych.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań w tym zakresie dla obróbki EDM. Widoczny jest na nim silny wpływ natężenia prądu na chropowatość powierzchni obrobionych omawianą metodą.



Rys. 2. Wpływ natężenia prądu technologicznego I_r na parametr chropowatości R_a powierzchni obrabianej EDM: 1 - generator tranzystorowy. 2 - generator RLC [15]

Innym czynnikiem z tej grupy dotyczącym EDM, PECM i LBM jest czas impulsu. Na rysunku 3 przedstawiono zależność parametru chropowatości powierzchni R_a od czasu impulsu zaobserwowaną dla obróbki PECM. Widoczne jest, że dla różnych wartości innych obserwowanych parametrów obróbki ze wzrostem czasu impulsu wartość parametru R_a rośnie (krzywe 1 i 2) lub maleje (krzywa 3).



Rys. 3. Zależność parametru chropowatości R_a od czasu impulsu t_i w obróbce PECM (10% roztwór NaCl, $U = 12\text{V}$):
 1) $S_0 = 0,10$ mm, $p_{in} = 0,35$ MPa, $k_w = 0,22$,
 2) $S_0 = 0,07$ mm, $p_{in} = 0,26$ MPa, $k_w = 0,15$,
 3) $S_0 = 0,07$ mm, $p_{in} = 0,20$ MPa, $k_w = 0,10$ [9]

Ważnym czynnikiem technologicznym w istotny sposób wpływającym na efekty obróbki, w tym również na chropowatość powierzchni uzyskaną po obróbce erozyjnej, jest płyn obróbkowy (oczywiście tam gdzie on występuje). Wpływ ma zarówno rodzaj tego płynu, jak również jego stężenie i temperatura, a także, szczególnie w przypadku ECM, natężenie jego przepływu. Z tym ostatnim czynnikiem związany jest także kolejny - szczelina międzyelektrodowa. Wpływ ten widoczny jest również na rysunku 3.

Odmienny charakter ma obróbka laserowa, dlatego też inne są czynniki technologiczne wpływające na efekty obróbki tą metodą. Wśród najistotniejszych wymienić należy własności materiału obrabianego: gęstość i ciepło właściwe, a także obecność w strefie obróbki gazu aktywnego lub obojętnego.

3.2. Czynniki konstrukcyjne

W przypadku obróbki EDM, ECM oraz AMM podstawowym czynnikiem konstrukcyjnym decydującym o chropowatości obrabianych powierzchni jest postać konstrukcyjna narzędzia, a głównie jego geometryczne cechy konstrukcyjne np. grubość tarczy w przypadku AMM, rozmieszczenie osełek dla ECH, a także tworzywo z jakiego zostało wykonane narzędzie do EDM.

Bardzo istotnym czynnikiem konstrukcyjnym jest także rodzaj użytego zasilacza prądowego (ECM) lub generatora impulsów (EDM). Tę ostatnią zależność zauważyć można wyraźnie na rysunku 2.

W przypadku obróbki laserowej ważnym czynnikiem konstrukcyjnym jest układ optyczny lasera. Dla zapewnienia dobrej transmisji wiązki laserowej niezbędne jest precyzyjne skupienie i wprowadzenie wiązki do światłowodu z minimalnymi stratami.

3.3. Czynniki o innym charakterze

W tej grupie czynników są czynniki charakterystyczne tylko dla poszczególnych rodzajów obróbek. Tak na przykład dla honowania elektrochemicznego (ECH) bardzo istotnym czynnikiem jest liczba wykonanych cykli pracy. Ze wzrostem tej liczby zaobserwowano wyraźny spadek wartości Ra honowanych otworów [3].

W przypadku obróbki EDM istotnymi czynnikami z tej grupy są parametry kinematyczne obrabiarki - zakres i możliwości ich regulacji.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiona powyżej synteza informacji dotyczących chropowatości powierzchni obrabianych metodami wspomaganymi prądem elektrycznym może stanowić praktyczną wskazówkę przy doborze metody obróbki. Opracowano ją na podstawie ograniczonego (z przyczyn oczywistych), lecz zdaniem autora reprezentatywnego zbioru informacji literaturowych. Chropowatość jest oczywiście tylko jednym z wielu możliwych kryteriów doboru, tym nie mniej w odniesieniu do niektórych trudno obrabialnych tworzyw kryterium to może być nadrzędne.

Zestawienie czynników mających wpływ na rezultaty obróbki, szczególnie w zakresie uzyskiwanych chropowatości, służyć może do zwrócenia uwagi przy opracowywaniu procesu technologicznego na te czynniki, które decydują o chropowatości powierzchni roboczych, a tym samym o cechach użytkowych maszyn, w których skład wchodzi.

LITERATURA

- [1] Asfour H.M., El-Dardery M.A., Osman H.M.: Investigation of some electrochemical drilling working conditions. Materiały Konferencji N-T EM '86. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1986.
- [2] Barwicki A.: Tuszowanie elektroerozyjne. Materiały Konferencji N-T EM '86. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1986.
- [3] Budzyński A.F., Zakościelny St.: Badania ścierności i ścieralności powierzchni honowanej elektrochemicznie. Materiały Konferencji N-T EM '82. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1982.
- [4] Filipowicz W.: Modułowa precyzyjna drążarka elektroerozyjna typ DE.A11. Materiały Konferencji N-T EM '86. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1986.
- [5] Kozak J., Dąbrowski L., Gawryś M., Łubkowski K., Szulc A.: Frezowanie elektrochemiczne powierzchni kształtowych. Materiały Konferencji N-T EM '86. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1986.
- [6] Kozak J., Dąbrowski L., Łubkowski K.: Impulsowa obróbka elektrochemiczna. Materiały Konferencji N-T EM '82. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1982.
- [7] Lewandowski Wł.: Dogłądanie elektrochemiczno-ścierne uzębień kół zębatych. Materiały Konferencji N-T EM '86. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1986.
- [8] Łubkowski K., Dąbrowski L., Kozak J., Rozenek M.: Obrabiarki elektrochemiczne do wygładzania powierzchni i usuwania zadziorów. Materiały Konferencji N-T EM '90. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1990.
- [9] Łubkowski K., Zawora J.: Dobór parametrów optymalnych impulsowej obróbki elektrochemicznej IECM. Materiały Konferencji N-T EM '82. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1982.
- [10] Malczyk B., Warmuz St.: Wybrane technologiczne zastosowania lasera molekularnego CO₂ produkcji krajowej. Materiały Konferencji N-T EM '82. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1982.
- [11] Nowicki B.: Badania właściwości warstwy wierzchniej części maszyn polerowanych elektrolitycznie. Materiały IV Konferencji N-T "Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej". Gorzowski Ośrodek Badań i Ekspertyz Naukowych. Gorzów - Lubniewice 1982.
- [12] Nowicki B.: Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni. WNT, Warszawa 1991.
- [13] Nowicki B., Spadło S.: Gładkościowa obróbka erozyjno-mechaniczna elastyczną elektrodą dyskretną. Przegląd Mechaniczny nr 8, 1994.
- [14] Pająk E.: Technologia anodowo-mechanicznego przecinania materiałów. Przegląd Mechaniczny nr 23-24, 1982.
- [15] Perończyk J.: Obróbka elektroerozyjna stopów żaroodpornych typu NIMONIC 80. Materiały Konferencji N-T EM '94. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz - Ciechocinek 1994.

- [16] Pszczołowski W., Zaborski St.: Elektrochemiczne szlifowanie węglików spiekanych neutralnym narzędziem. Materiały Konferencji N-T EM '86. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1986.
- [17] Ruszaj A.: Wpływ wybranych parametrów na dokładność kształtowo-wymiarową powierzchni po obróbce ECM. Materiały Konferencji N-T EM '82. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1982.
- [18] Stasiaczek B., Żebrowski H.: Mechanizm obróbki w warunkach gładzenia elektrochemicznego otworów z uwzględnieniem zjawisk fizykochemicznych w szczelinie międzyelektrodowej. Materiały Konferencji N-T EM '82. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1982.
- [19] Tomczak J.: Ciecze dielektryczne do drażenia elektroerozyjnego. Materiały Konferencji N-T EM '90. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1990.
- [20] Tomczak J.: Polerowanie elektroerozyjne. Materiały Konferencji N-T EM '90. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1990.
- [21] Wei B., Kozak J., Rajurkar K.P.: Study of pulse electrochemical machining of titanium alloy. Materiały Konferencji N-T EM '94. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz - Ciechocinek 1994.
- [22] Znidarski M., Junkar M.: Crater to pulse classification for EDM with the relative electrode to the workpiece motion. Materiały Konferencji N-T EM '94. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz - Ciechocinek 1994.

MICROGEOMETRY OF SURFACES WORKED BY ELECTRIC CURRENT AIDED MACHINING METHODS

Summary

In this paper is presented synthesis of literature messages referred surfaces roughness after machining with electric current aided. The most important, in author mind, properties which have an influence on obtained roughness is put together also. The collected messages can serve as a help in a choice of machining methods, particularly on the elements made of almost unworkable materials.

NIEJEDNORODNOŚĆ STRUKTURALNA WE WLEWKACH PRÓBNYCH Z NIESTOPOWEGO ŻELIWA SFEROIDALNEGO

Jan Sadowski *, Henryk Oleszycki **

Wydział Mechaniczny ATR

*Katedra Mechaniki Stosowanej

** Katedra Metaloznawstwa i Technologii Metali

ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pracy przedstawiono wpływ czynników, takich jak: skład chemiczny, stan wejściowy, rodzaj powierzchni na niejednorodność strukturalną we wlewkach próbnych z niestopowego żeliwa sferoidalnego. Wykazano, że czynniki te wpływają w istotny sposób na rozmieszczenie grafitu, ferrytu i cementytu w żeliwie.

Wprowadzono współczynnik określający ilościowe zmiany tej niejednorodności. Wyniki badań mogą mieć praktyczne znaczenie przy wyborze miejsca pobierania próbek z odlewów próbnych do badań materiałowych, gdzie wymagana jest duża jednorodność strukturalna.

Słowa kluczowe: żeliwo sferoidalne, niejednorodność strukturalna w odlewach

1. PRZEGLĄD LITERATURY

O własnościach wytrzymałościowych i jakości odlewów wykonanych z niestopowego żeliwa sferoidalnego decyduje w głównej mierze kształt wydzielen grafitowych i struktura osnowy metalicznej. Jednakże występująca zawsze w odlewach niejednorodność chemiczna i niejednorodność strukturalna, będąca wynikiem różnic szybkości chłodzenia i rozkładu pierwiastków (C, Si, Mn) w różnych makroobszarach odlewów wywiera również wpływ na własności mechaniczne żeliwa, szczególnie na własności plastyczne i udarność.

Głównym czynnikiem decydującym o niejednorodności chemicznej odlewu jest różna skłonność do segregacji głównych pierwiastków wchodzących w skład niestopowego żeliwa sferoidalnego a szczególnie: węgla, manganu i krzemu, a także szybkość chłodzenia odlewu przy przejściu przez zakres eutektyczny i eutektoidalny podczas stygnięcia w formie.

Występująca w związku z tym niejednorodność strukturalna będzie powodowała duże różnice wytrzymałości i twardości w różnych miejscach odlewów, a w konsekwencji różnice obrabialności przez np. skrawanie.

Autorzy prac [3,4], posługując się metodami głębokiego trawienia, obserwacjami makroskopowymi i mikroskopowymi, badali niejednorodność dendrytyczną oraz rozkład grafitu żeliwa szarego z grafitem płatkowym w odlewach krzepnących z różnymi prędkościami. Stwierdzili, że żeliwo podeutektyczne wykazuje większą niejednorodność dendrytyczną aniżeli eutektyczne oraz że większa niejednorodność występuje na po-

wierzchni odlewu niż w jego środku. Stwierdzono, że szybkość chłodzenia i skład chemiczny decyduje o wielkości ziaren eutektycznych. Wielkość tych ziaren wzrasta w miarę zmniejszenia szybkości chłodzenia, a ponadto zawartość ferrytu i grafitu jest zawsze większa w warstwie wierzchniej aniżeli w środku odlewu. Badania te oparte są na obserwacji zglądów oraz zdjęć i brak im ujęcia ilościowego.

J.Piaskowski w publikacji [1] badając perlityczne niestopowe żeliwo sferoidalne stwierdza, że wzrost grubości ścianki żeliwa (szybkości chłodzenia) od 20 do 220mm powoduje wzrost ilości i wielkości wydzielen grafitowych oraz zawartości ferrytu na przekroju odlewu, a tym samym spadek własności wytrzymałościowych (R_m , HB), pomimo, że wydłużenie pozostaje na nie zmienionym poziomie. Zmiany te tłumaczy wpływem szybkości chłodzenia, która powoduje zmianę rozkładu wydzielen grafitowych i składników strukturalnych.

Podobnie w monografii [5] ten sam autor podaje wyniki badań rozkładu składników strukturalnych w odlewach z żeliwa sferoidalnego o średnicach od 10 do 60 mm, krzepnących w formach metalowych. Z badań wynika, że w odlewach o dużej średnicy występowała duża zawartość wolnego cementytu, przy czym zawsze otrzymano większą jego zawartość w warstwie wierzchniej odlewu aniżeli w środku. Zawartość perlitu wykazywała relację odwrotną i była największa dla średnicy 60mm w środku odlewu.

Autorzy pracy [2] w celu określenia niejednorodności struktury wysokojakościowego żeliwa sferoidalnego przedstawili krzywe zmian twardości żeliwa w miarę oddalania się od powierzchni odlewu oraz ustalili wpływ czynników krystalizacji, takich jak: temperatura zalewania i szybkość chłodzenia na rozkład twardości i niejednorodności struktury tworzącej się na powierzchni i w środku odlewu.

Lewitan i inni [6] badając wpływ manganu na strukturę i własności żeliwa szarego oceniali wielkość i zawartość grafitu oraz perlitu na powierzchni odlewu i na głębokości 15 mm. Stwierdzili, że ilość kulek grafitowych zwiększa się ze wzrostem manganu, przy czym jest ich zawsze więcej na powierzchni aniżeli w dalszych partiach odlewu. Zawartość perlitu wzrasta także ze wzrostem Mn, lecz wykazuje relację odwrotną do grafitu.

Obszerniejsze badania nad niejednorodnością strukturalną w niestopowym żeliwie sferoidalnym o różnym składzie chemicznym przeprowadził Zarubin [7,8]. W pracy [7] badał rozkład i dyspersję grafitu kulkowego w poszczególnych częściach odlewu klinowego. Z jego badań wynika, że zawartość i liczba wydzielen grafitowych wzrasta w miarę oddalania od podstawy odlewu i jest najwyższa tuż przy nadlewie. Powyższe wyniki badań obrazuje tablica 1. Średnią odległość między wydzieleniami grafitowymi obliczono ze wzoru:









$$C = \frac{1}{1,895^3 \sqrt{n^{1,6}}}, \quad (1)$$

gdzie:

- C - średnia odległość między cząstkami grafitu, μm ,
- n - liczba wydzielen na powierzchni 1mm^2 szlifi.

Również w pracy [8] Zarubin badał niejednorodność rozkładu grafitu w żeliwie sferoidalnym na odlewach wykonanych w kształcie koniczynek, z których odcinano wałki o średnicach 20,30,40,50 i 100mm. Dokonał badań zawartości grafitu oraz jego dys-

Tablica 1. Wyniki badań ilości dyspersji grafitu w różnych częściach odlewu żeliwa sferoidalnego [7]

Nr Części Odlew	Średnie pole wydzieleni grafitów w μm	Zawartość grafitu %	Liczba wydzieleni grafitu w 1mm^2	Liczba wydzieleni grafitu w 1mm^3	Odległość między wydzieleniami grafitu μm	Udział wydzieleni grafitu w 1mm^3 w stos. do 1mm^2	Średni wymiar grafitu w μm	Schemat
Powierzchnia odlewu (P)								
1	2450	9,2	37,6	1305	122	4,4	65	
2	2450	8,4	33,2	1180	136	3,8	66	
3	2500	7,8	31,2	1100	137	3,8	67	
4	2400	7,2	30,0	1010	140	3,4	69	
Środek odlewu (S)								
1	2400	8,0	36	1360	130	4,1	70	
2	2390	7,6	29	890	140	3,4	72	
3	2250	6,3	28	960	143	3,4	73	
4	2230	6,7	28	980	148	3,4	75	

Nr 1 - odpowiada części odlewu tuż przy nadlewie, kolejne numery odpowiadają częściom dolnym odlewu

persji i stwierdził, że maksymalną jego zawartość oraz ilość wydzielań na 1mm^2 powierzchni otrzymano w odlewach o mniejszej średnicy (większej szybkości chłodzenia), a wielkość grafitu oraz odległości między wydzieleniami grafitowymi wzrasta ze wzrostem średnicy odlewu.

Podobnie H.Mayer i F.Hämmerli [9] stwierdzili, badając niestopowe żeliwo sferoidalne, że ze wzrostem grubości ścianki odlewu ilość wydzielań grafitu kulkowego zmniejsza się, natomiast średnica kulek rośnie, a ich sferyczność ulega pogorszeniu.

G.N.Gilbert i M.J.Mech [10] stwierdzają, że wielkość ziarna ferrytu w żeliwie sferoidalnym rośnie wraz ze wzrostem grubości ścianki.

D.A.Haris i R.J.Maitland [14] badając strukturę wlewków próbnych typu Y stwierdzili, że w górnej części odlewów (przy nadlewie) liczba sferoidów grafitowych jest mniejsza, a ich średnica większa aniżeli w części dolnej. Jednakże w badaniach uznali te różnice za mało istotne ażeby brać je pod uwagę przy pobieraniu próbek.

Autorzy opracowania [11] przeprowadzili badania nad wpływem liniowo zmiennej grubości ścian odlewów z niestopowego żeliwa sferoidalnego przy różnych warunkach austenitizacji na skład struktury w różnych częściach odlewu klinowego, przy różnej zawartości manganu w żeliwie. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem grubości klina ilość ferrytu i średnica kulek grafitowych rośnie, a dyspersja perlitu maleje. Ponadto autorzy stwierdzają, że ilość ferrytu po krystalizacji pierwotnej jest zawsze większa na powierzchni odlewu niż w jego środku.

Zastosowanie dodatkowego wyżarzania normalizującego, zdaniem autorów, prowadzi do odwrócenia sytuacji strukturalnej stanu surowego tzn. więcej ferrytu występuje w środku odlewu niż w strefie przypowierzchniowej. Ponadto wyżarzanie to powoduje zmniejszenie różnic w strukturze osnowy między cienkimi i grubymi częściami próbek klinowych, a przy dużej zawartości manganu (1,17% Mn) i odpowiednich warunkach wyżarzania można doprowadzić do jednakowej struktury osnowy żeliwa w całym badanym zakresie grubości ścian. Jednakże autorzy nie wyjaśniają w pracy przyczyn omawianych powyżej zjawisk.

Z przytoczonego przeglądu literatury wynika, że badaniom nad niejednorodnością strukturalną w odlewach próbnych z niestopowego żeliwa sferoidalnego poświęcono sporo miejsca. Niejednorodność strukturalna odlewów z żeliwa sferoidalnego jest rzeczą naturalną i mimo jej występowania odlewy z tego tworzywa mają szerokie zastosowanie. Jednakże ta niejednorodność ma bardzo duże znaczenie w odlewach służących do badań własności mechanicznych, a w szczególności do badań przemian strukturalnych w obróbce cieplnej. Znane są przypadki pobierania próbek o wymiarach $8 \times 8 \times 8$ mm z całej przyrzatycznej części odlewu próbnego typu Y [15]. Jednakże, w celu zmniejszenia przypadkowości i rozrzutu wyników badań należałoby określić bliżej niejednorodność strukturalną w tych odlewach, aby móc dokonać takiego wyboru próbek, który gwarantowałby najmniejszy błąd przypadkowy. Z tego powodu uznano za celowe zbadanie i opisanie tej niejednorodności w odlewach typu Y w stanie surowym oraz po najprostszej obróbce cieplnej.

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

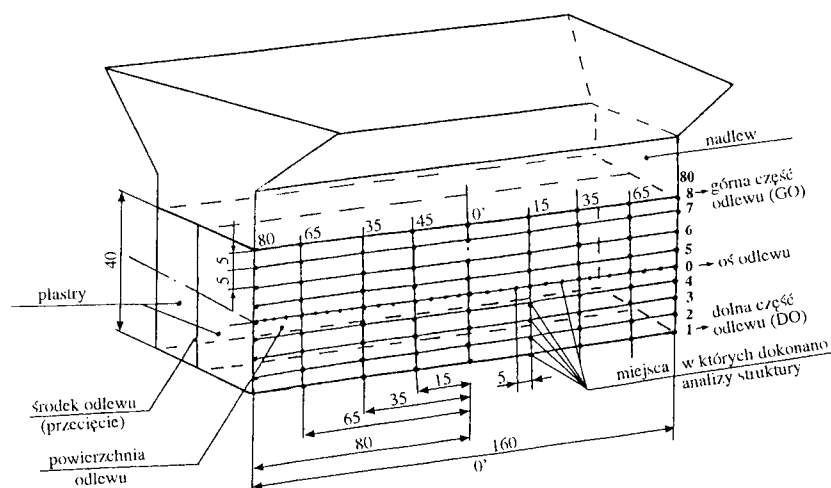
Do badań przyjęto trzy rodzaje niestopowego żeliwa sferoidalnego wytopionego w żeliwaku kwaśnym z grzaniem dmuchem i odlanego do form piaskowych w kształcie klina Y2 wg PN-88/H-83124. Skład i niektóre własności żeliwa podano w tablicy 2.

Tablica 2. Skład chemiczny i własności badanych żeliw

Nr żeliw	Skład chemiczny % wag.						p	k	p	k	T _{gr}	HB
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ac I	Ac I	Ar I	Ar I		
1	3,55	2,66	0,69	0,10	0,007	0,1	786	821	732	701	711	238
2	3,37	2,36	1,22	0,11	0,007	0,1	791	835	742	690	717	265
3	3,51	2,52	0,65	0,10	0,007	0,25	794	817	743	709	750	297

Badania obejmowały dolną część wlewka próbnego (po uprzednim odcięciu nadlewu i usunięciu skrawaniem naskórka odlewniczego), którą rozcięto przez środek (przy wymiarze 40x160 mm) na dwa plastry. Schemat rozcięcia klina Y2 oraz oznaczenie miejsc i punktów na powierzchni i w środku odlewu, na których wykonano ilościowe pomiary struktury przedstawiono na rysunku 1. Pomiary struktury wykonano metodą metalografii ilościowej [17].

W oznaczonych na rysunku punktach pomiarowych dokonano pomiarów zawartości grafitu, ferrytu i cementytu wtórnego dla wszystkich rodzajów żeliwa w stanie surowym i po wyżarzeniu ujednorodniającym połączonym z chłodzeniem w powietrzu (normalizacja). Pomiary te wykonano na dwóch plastrach z każdego gatunku, stosując powiększenie 250 x, siatkę okularową o 441 węzłach, przyjmując 12 przyłożeń siatki na każdy punkt pomiarowy.



Rys.1. Schemat rozkroju klina odlewu próbnego Y2 oraz oznaczenie miejsc, w których dokonano analizy strukturalnej

Wyzaranie dolnych części wlewków (plastrów) przeprowadzono w piecu PSK-3, po skręceniu śrubami plastrów tego samego gatunku w taki sposób, aby środkowe powierzchnie stykały się, zabezpieczając je przed utlenieniem przez pokrycie warstwą miedzi. Złączone plastry załadowano do trzech pojemników (jeden gatunek w pojemniku) wypełnionych prażonym piaskiem kwarcowym z dodatkiem węgla drzewnego i zabezpieczonym azbestem. Pojemniki wygrzewano w temperaturze 1323K (1050°C) w czasie 32h, po czym chłodzono z piecem do 1153K (880°C) i dalej w powietrzu.

W celu dokonania ilościowej oceny zmian niejednorodności rozkładu składników strukturalnych w odlewach w zależności od składu chemicznego, rodzaju powierzchni (wierzch lub środek) odlewu, stanu wejściowego i sposobu okrojenia odlewu próbnego, zastosowano statystyczne kryteria porównawcze, opierając się na znanych miernikach rozproszenia zjawisk przypadkowych w próbce [16,18].

Dokonano oszacowania jednorodności strukturalnej w odlewach przez wprowadzenie współczynnika niejednorodności k_N liczonego wg wzoru:

$$k_N = \frac{t_p^{n-1} S_n}{\sqrt{n \cdot \bar{x}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

gdzie:

- t_p^{n-1} - współczynnik Studenta dla poziomu prawdopodobieństwa p i liczby stopni swobody $n-1$,
- S_n - odchylenie standardowe dla liczonych składników strukturalnych,
- \bar{n} - liczba punktów pomiarowych,
- \bar{x} - średnia zawartość składnika strukturalnego w badanym obszarze.

Współczynnik niejednorodności k_N - wyrażający w procentach całkowitą zawartość rozpatrywanego składnika strukturalnego na określonej powierzchni pomiarowej - przyjęto za miarę wielkości niejednorodności strukturalnej odlewu przyjmując, że im jego wartość będzie mniejsza (będzie zbliżała się do jedności), tym większa jest jednorodność osnowy metalicznej w odlewie na danej powierzchni.

Celem wykazania liczbowych zmian niejednorodności na określonych powierzchniach wlewka próbnego i wybrania najbardziej jednorodnej objętości dla danych warunków pod względem rozkładu składników strukturalnych, dokonano także porównawczych obliczeń współczynnika k_N dla odlewów usystematyzowanych według przedstawionych poniżej wariantów okrojania boków odlewu:

- wariant I - odlew bez okrojania boków,
- wariant II - okrojenie 5 mm z dołu i z boków odlewu,
- wariant III - okrojenie 5 mm z dołu i 10 mm z boków odlewu,
- wariant IV - okrojenie 10 mm z dołu i 5 mm z boków odlewu,
- wariant V - okrojenie 10 mm z dołu i z boków odlewu,
- wariant VI - okrojenie 10 mm z dołu i 15 mm z boków odlewu.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki otrzymanych badań przedstawiono w formie płaszczyzn odwzorowujących pryzmatyczną część wlewka próbnego w jego środku i na powierzchni, na które nanesiono izolinie zmian procentowych zawartości badanych składników strukturalnych pomierzonych w punktach ustalonych metodyką badań.

Na rysunkach 2,3 i 4 przedstawiono izolinie zmian zawartości grafitu, ferrytu i cementytu wtórnego, kolejno dla żeliwa nr 1,2 i 3 w stanie surowym, a na rysunkach 5,6 i 7 przedstawiono izolinie zmian tych samych składników strukturalnych żeliwa po wyżarzaniu ujednorodniającym.

Na rysunkach obszary procentowej zawartości badanych składników podano symbolami A,B,C,D..., przy czym wymienione powyżej symbole bez apostrofu odnoszą się do obszarów środka odlewu (linie ciągłe na rysunkach), a z apostrofem (linie przerywane) do obszarów powierzchni odlewu. Przyjęto na wszystkich rysunkach jednakowe zakresy zmian procentowych składników strukturalnych i wynoszą one:

dla obszarów A - $0 \div 1$

dla obszarów B - $1 \div 2$

dla obszarów C - $2 \div 4$

dla obszarów D - $4 \div 6$

dla obszarów E - $6 \div 8$

dla obszarów F - $8 \div 10$

dla obszarów G - $10 \div 12$

dla obszarów H - $12 \div 14$

dla obszarów I - $14 \div 16$

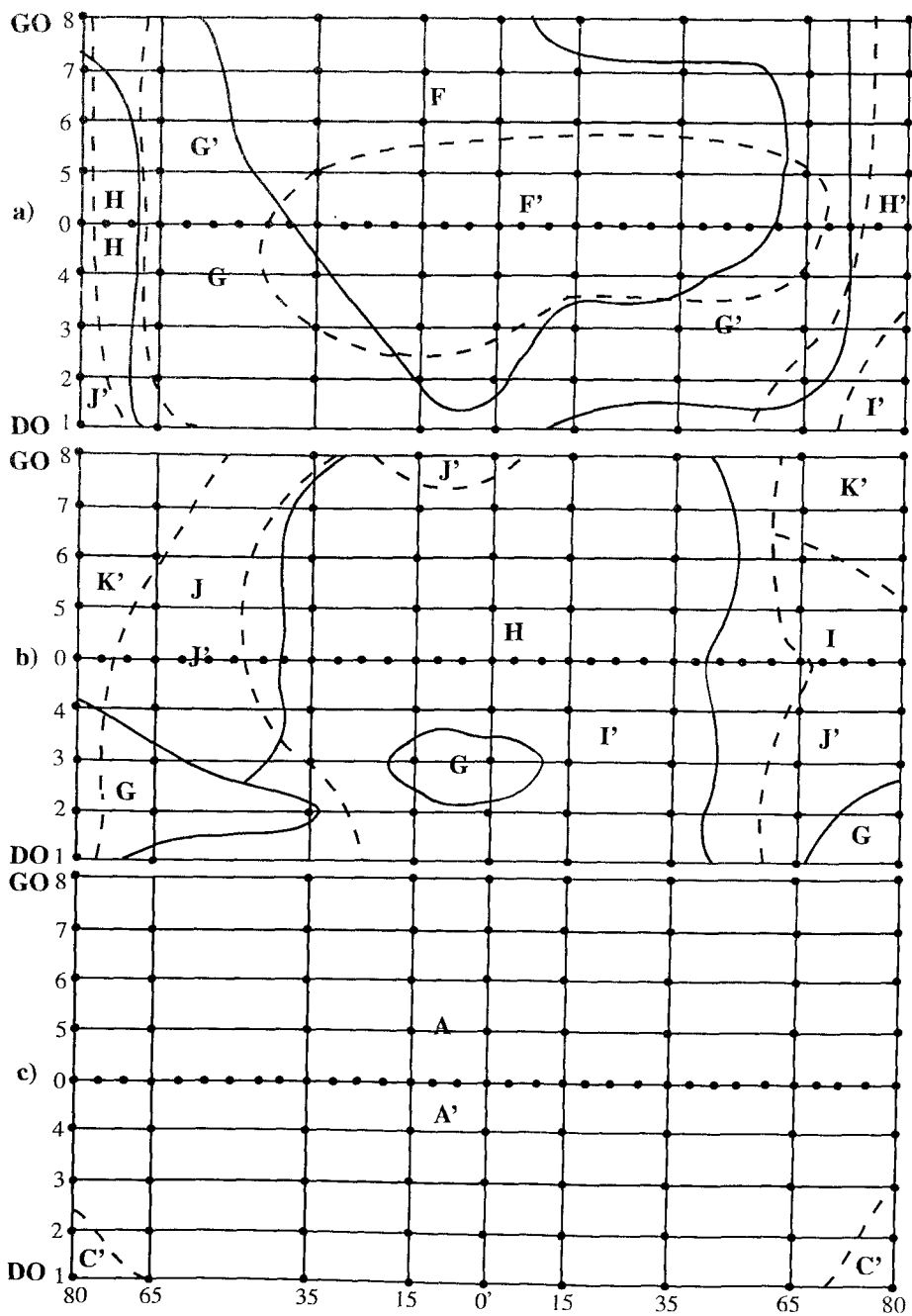
dla obszarów J - $16 \div 20$

dla obszarów K - $20 \div 26$

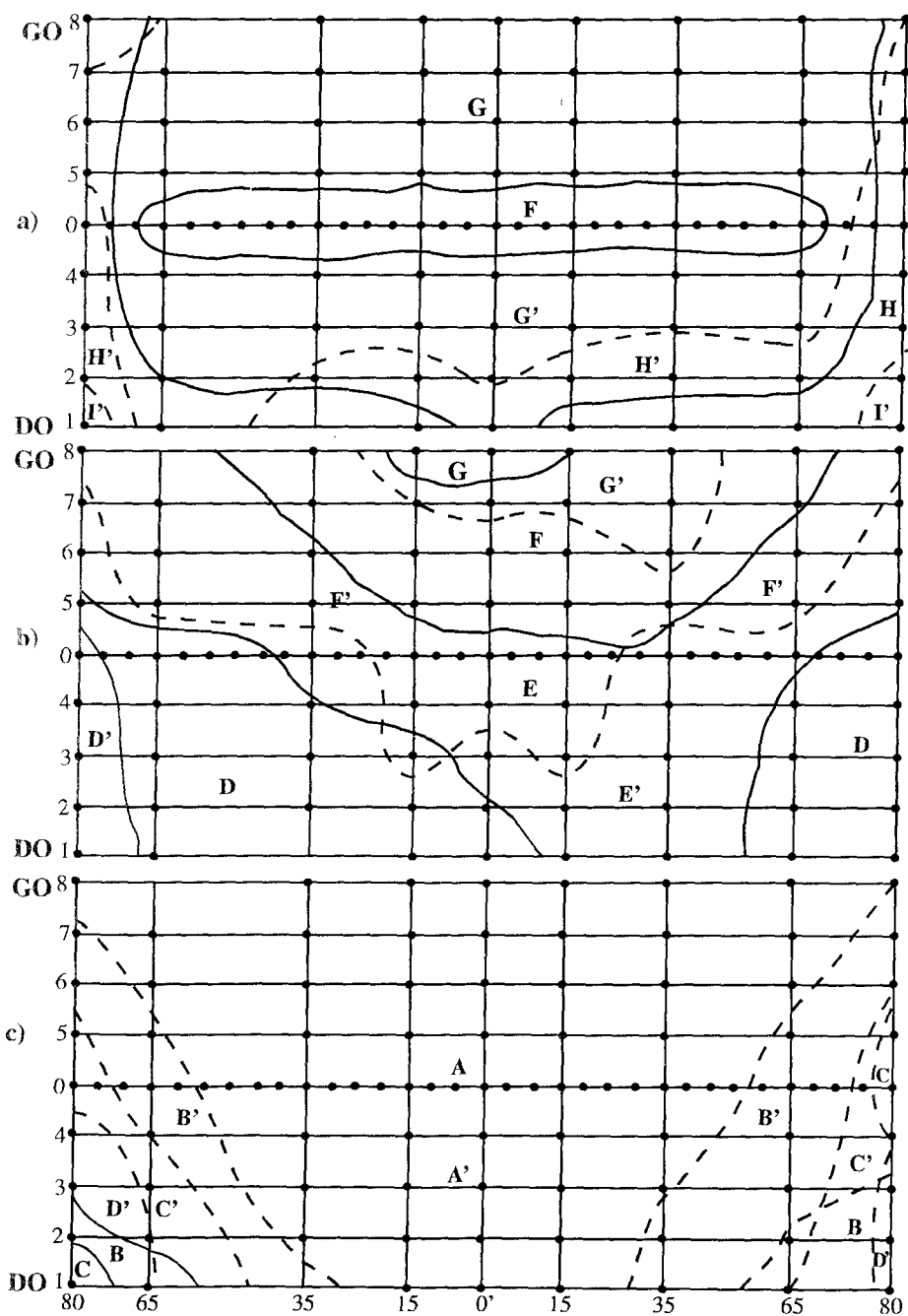
W tablicy 3 przedstawiono obliczone wartości współczynników niejednorodności k_N w badanych odlewach próbnym dla poszczególnych składników strukturalnych w zależności od stanu wejściowego żeliwa (surowe, ujednorodnione), które obliczono dla poziomu istotności $\alpha=0,05$ oraz podano także w procentach ekstremalne wartości poszczególnych składników osnowy badanych żeliw.

W tablicy 4 podano obliczone wartości tych współczynników dla poszczególnych wariantów okrojania odlewów próbnym. Na rysunku 8 przedstawiono schemat optymalnego sposobu okrojania odlewu próbnego dla różnych stanów wejściowych i składu chemicznego, umożliwiającego z założonym prawdopodobieństwem otrzymanie powierzchni o możliwie najmniejszej niejednorodności składników strukturalnych osnowy metalowej żeliwa.

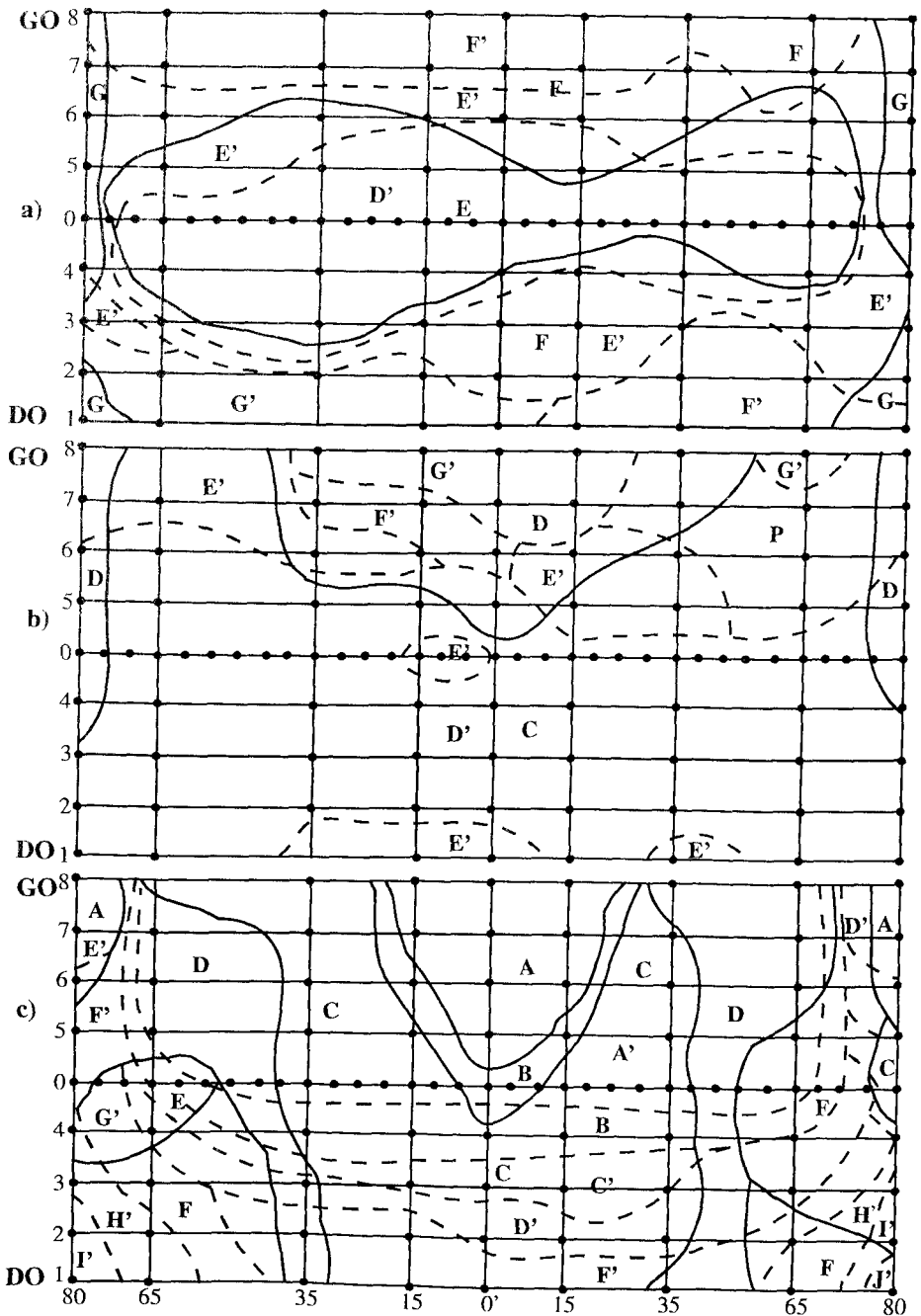
Na podstawie analizy otrzymanych wyników badań przedstawionych na rys.2-7 oraz tabel 3 i 4 można stwierdzić wyraźny wpływ badanych czynników, takich jak: stan wejściowy, skład chemiczny, rodzaj powierzchni odlewu na niejednorodność strukturalną oraz rozkład składników struktury badanych odlewów próbnym niestopowego żeliwa sferoidalnego, który ogólnie można sformułować następująco:



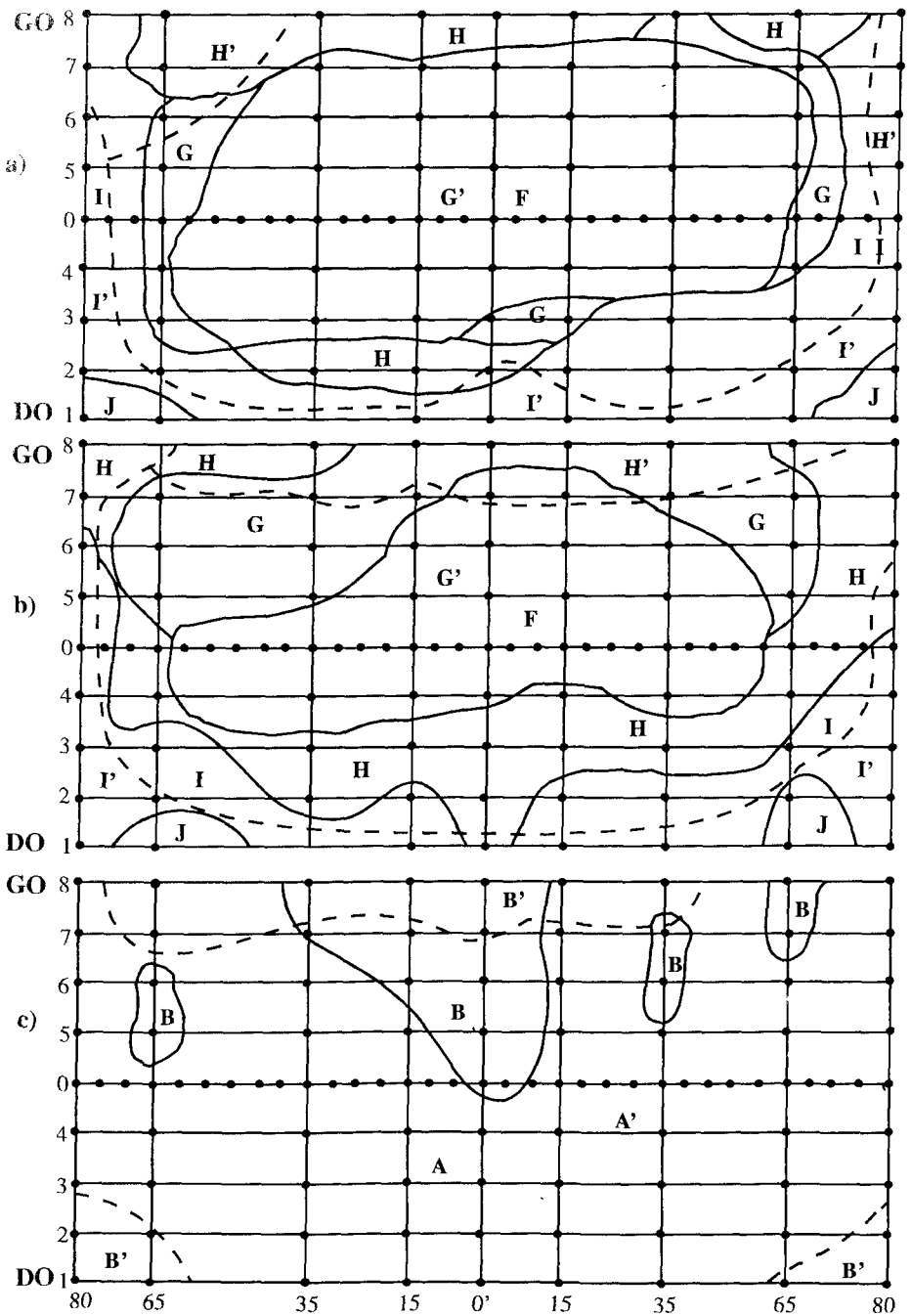
Rys.2. Izolinie rozkładu struktury w odlewach próbnych żeliwa nr1 w stanie surowym dla:
 a) grafitu, b) ferrytu, c) cementytu wtórnego



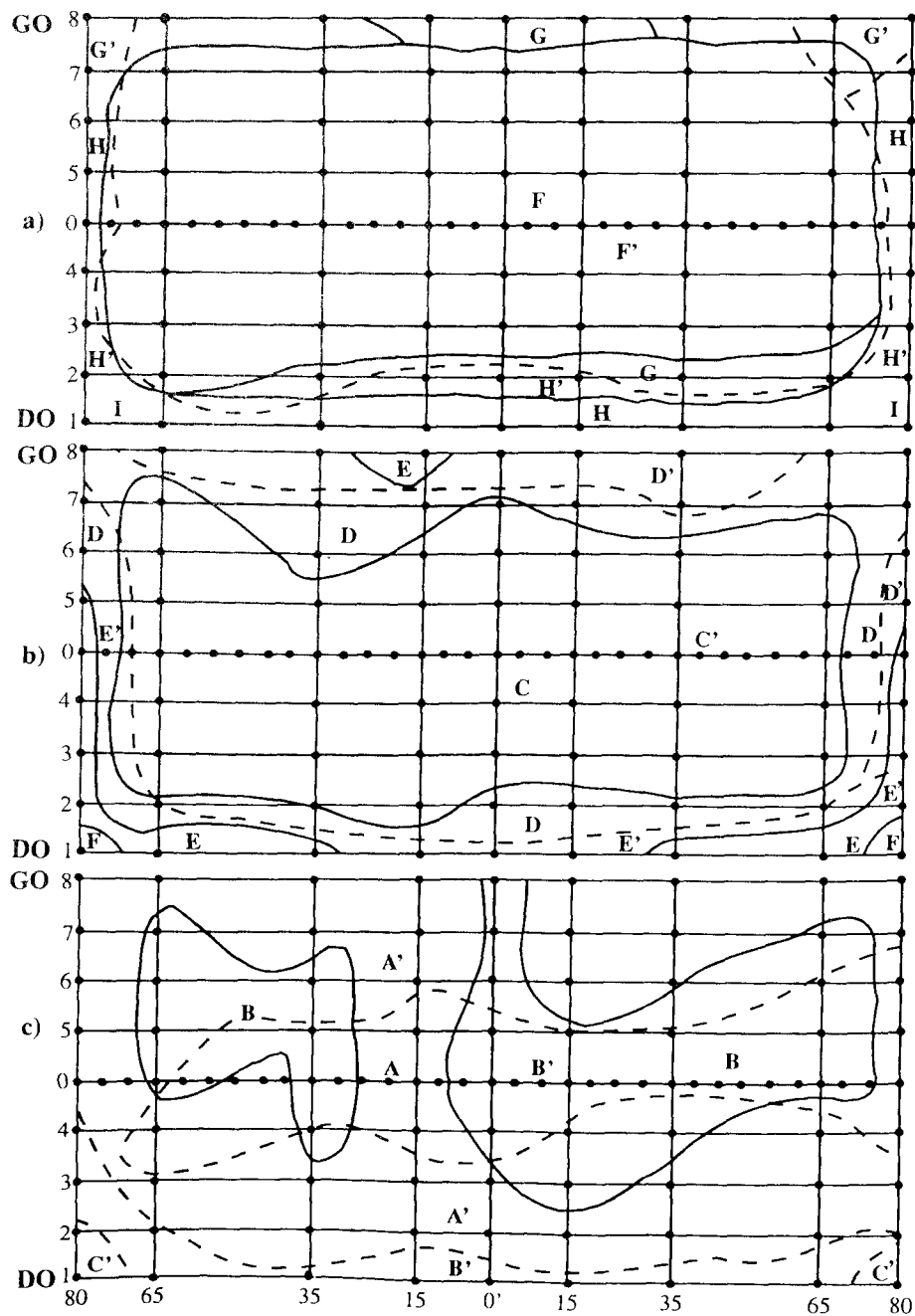
Rys.3. Izolinie rozkładu struktury w odlewach próbnych żeliwa nr 2 w stanie surowym dla: a) grafitu, b) ferrytu, c) cementytu wtórnego



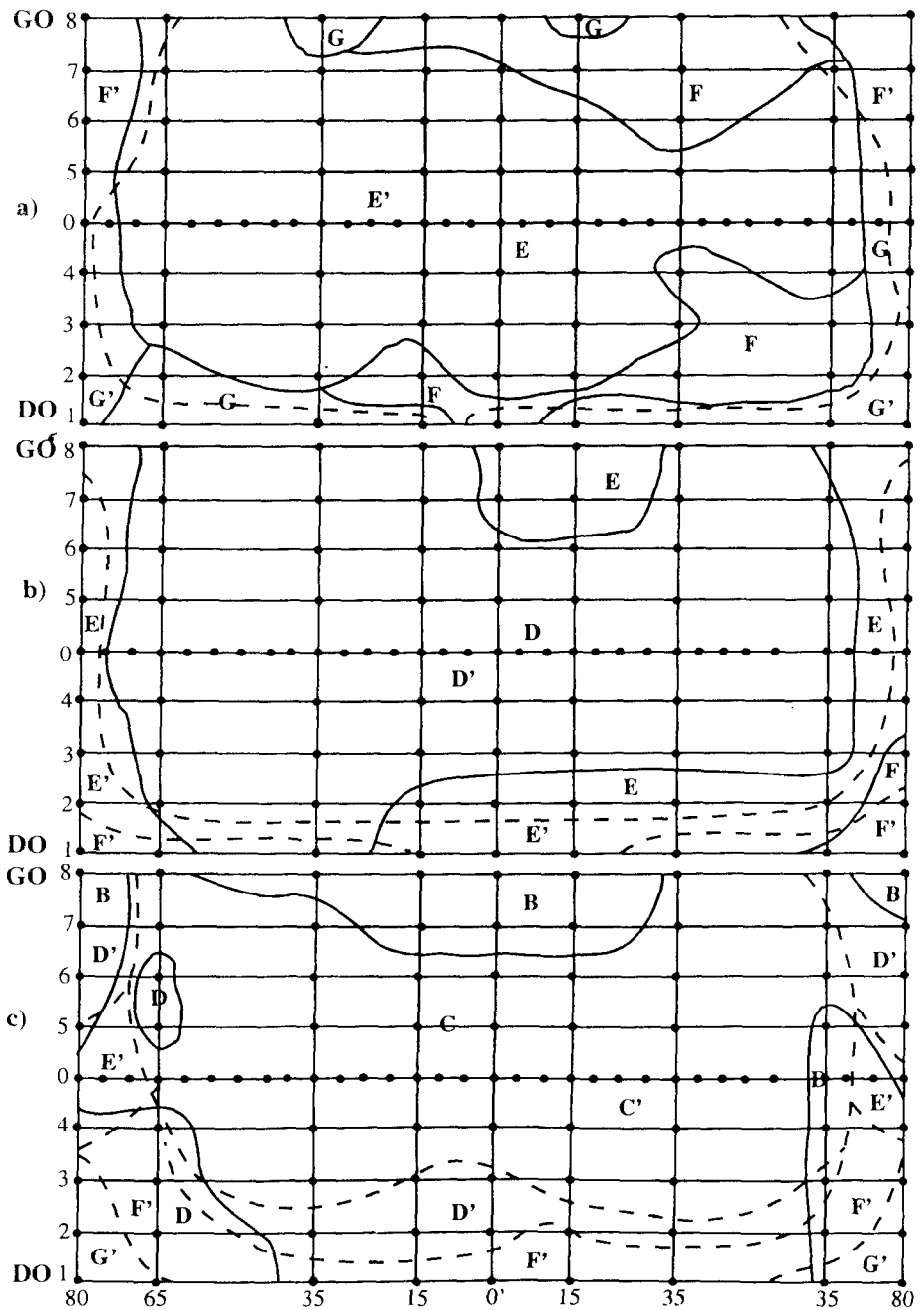
Rys.4. Izolinie rozkładu struktury w odlewach próbnych żeliwa nr 3 w stanie surowym dla:
 a) grafitu, b) ferrytu, c) cementytu wtórnego



Rys.5. Izolinie rozkładu struktury w odlewach próbnych żeliwa nr 1 po wyzraniu ujednorodniającym dla: a) grafitu, b) ferrytu, c) cementytu wtórnego



Rys.6. Izolinie rozkładu struktury w odlewach próbnym żeliwa nr 2 po wyzraniu ujednorodniającym dla: a) grafitu, b) ferrytu, c) cementytu wtórnego



Rys.7. Izolinie rozkładu struktury w odlewach próbnym żeliwa nr 3 po wyżarzaniu ujednorodniającym dla: a) grafitu, b) ferrytu, c) cementytu wtórne

Tablica 3. Wartości współczynników niejednorodności k_N i wartości ekstremalne składników strukturalnych w badanych odlewach żeliwa sferoidalnego wyrażone w procentach.

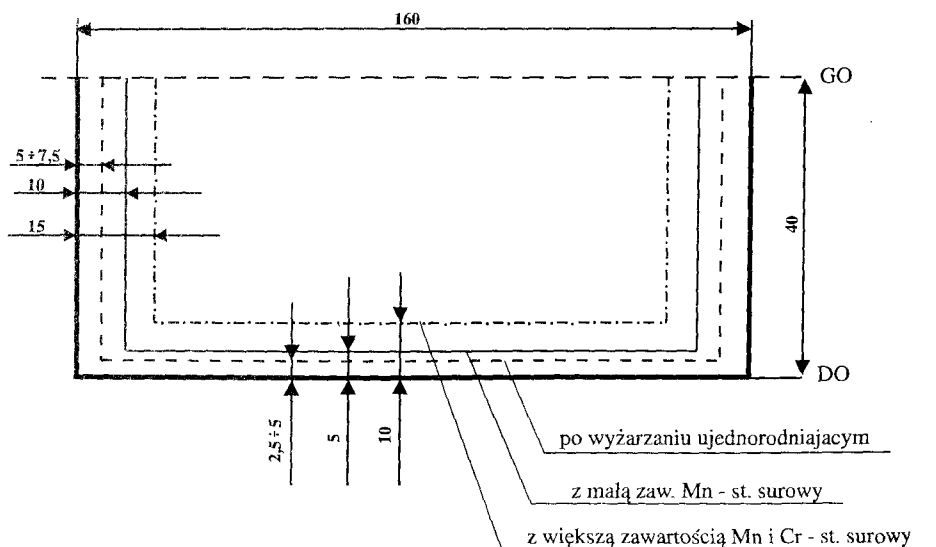
Analizow. składnik	stan surowy						po wyzrzeniu									
	1			2			3			1			2			
	k_N	X_{\min} - X_{\max}	k_N	X_{\min} - X_{\max}	k_N	X_{\min} - X_{\max}	k_N	X_{\min} - X_{\max}	k_N	X_{\min} - X_{\max}	k_N	X_{\min} - X_{\max}	k_N	X_{\min} - X_{\max}	k_N	X_{\min} - X_{\max}
Grafit	$\frac{6,13}{9,12}$	$\frac{9,2-15,3}{8,9-13,1}$	$\frac{6,67}{9,70}$	$\frac{10,3-14,1}{8,8-13,5}$	$\frac{8,13}{9,25}$	$\frac{5,9-11,3}{7,5-11,6}$	$\frac{6,16}{8,92}$	$\frac{9,8-16,4}{11,3-15,3}$	$\frac{6,17}{9,53}$	$\frac{9,3-13,1}{8,5-14,2}$	$\frac{7,41}{9,55}$	$\frac{9,3-13,1}{8,5-14,2}$	$\frac{7,41}{9,55}$	$\frac{9,3-13,1}{8,5-14,2}$	$\frac{7,41}{9,55}$	$\frac{7,3-11,7}{6,5-10,4}$
Feryt	$\frac{4,62}{3,95}$	$\frac{14,0-26,1}{11,1-15,4}$	$\frac{5,33}{4,21}$	$\frac{4,7-12,1}{4,0-10,5}$	$\frac{6,68}{5,56}$	$\frac{3,9-11,8}{3,8-6,5}$	$\frac{2,17}{1,61}$	$\frac{10,7-15,8}{6,9-17,6}$	$\frac{3,41}{3,98}$	$\frac{3,4-7,3}{3,2-8,0}$	$\frac{5,55}{4,72}$	$\frac{3,4-7,3}{3,2-8,0}$	$\frac{5,55}{4,72}$	$\frac{3,4-7,3}{3,2-8,0}$	$\frac{5,55}{4,72}$	$\frac{4,4-9,2}{4,1-8,1}$
Cementyt	$\frac{11,43}{4,54}$	$\frac{0,1-3,0}{0,2-0,5}$	$\frac{12,09}{9,86}$	$\frac{0,2-6,2}{0,4-2,6}$	$\frac{17,84}{11,02}$	$\frac{0,3-17,1}{0,2-9,8}$	$\frac{5,99}{6,47}$	$\frac{0,3-1,8}{0,4-1,2}$	$\frac{5,81}{6,23}$	$\frac{0,3-2,7}{0,4-1,4}$	$\frac{6,14}{5,76}$	$\frac{0,3-2,7}{0,4-1,4}$	$\frac{6,14}{5,76}$	$\frac{0,3-2,7}{0,4-1,4}$	$\frac{6,14}{5,76}$	$\frac{2,2-10,7}{1,4-5,8}$

W liczniku podano wartości współczynnika k_N oraz ekstremalne składników strukturalnych dla powierzchni, w mianowniku dla środka odlewu.

Tablica 4. Wartości współczynników niejednorodności k_N dla poszczególnych wariantów okrojzenia odlewu

Nr zel.	Analiz. składnik	stan surowy						po wyżarzaniu					
		Warianty okrojzenia						Warianty okrojzenia					
		I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI
1	Grafit	6.13	5.33	4.84	5.03	4.41	4.04	6.16	5.66	5.61	5.73	5.46	5.52
	Ferryt	9.12	7.38	6.20	6.48	5.75	5.65	8.92	7.85	7.49	7.58	7.34	6.91
	Cementyt	4.62	3.97	3.83	3.65	3.73	3.51	2.17	1.89	1.73	1.75	1.80	1.65
2	Grafit	11.43	8.51	7.09	6.85	5.74	5.83	5.99	4.73	3.95	3.53	2.89	2.97
	Ferryt	4.54	4.22	4.23	4.08	3.85	3.76	6.46	5.94	4.62	3.58	3.71	3.62
	Cementyt	6.67	5.40	5.94	5.00	5.20	4.67	6.17	5.61	5.21	5.61	4.48	4.56
3	Grafit	9.70	8.15	8.34	7.06	7.57	7.08	9.53	8.48	7.95	8.98	6.54	6.19
	Ferryt	5.53	4.69	4.26	4.10	3.99	3.89	3.41	3.13	2.97	3.03	2.63	2.56
	Cementyt	4.21	3.39	3.70	3.37	2.98	2.09	3.98	3.54	3.74	3.48	3.14	2.82
3	Grafit	12.09	8.47	7.13	6.68	5.97	5.53	5.81	5.11	4.76	4.71	4.35	4.02
	Ferryt	9.86	7.39	6.51	5.03	4.74	2.17	6.23	6.04	5.29	5.23	4.98	4.11
	Cementyt	8.13	6.51	6.99	5.53	4.23	3.82	7.41	6.82	6.00	6.15	5.26	4.52
3	Grafit	9.25	7.94	7.68	6.38	5.09	4.81	9.55	8.02	8.21	7.65	6.44	5.16
	Ferryt	6.68	5.68	5.61	4.74	3.94	2.27	5.55	4.77	4.87	4.99	4.31	4.21
	Cementyt	5.65	4.94	4.55	4.16	3.20	2.18	4.72	4.19	4.24	4.10	3.16	3.22
3	Grafit	17.84	9.45	8.21	7.84	5.38	3.96	6.14	5.22	5.03	5.19	4.57	4.35
	Ferryt	11.02	7.93	5.73	4.89	3.19	2.20	5.76	4.93	4.90	4.61	4.20	4.43
	Cementyt												

W liczniku podano wartości współczynnika k_N dla powierzchni, w mianowniku dla środka odlewu



Rys.8. Schematyczne przedstawienie optymalnych sposobów okrojenia odlewu próbnego, zapewniających dużą jednorodność strukturalną w powstałej części wlewka

- występowanie grafitu w różnych obszarach odlewu próbnego w niestopowym żeliwie sferoidalnym jest zróżnicowane. Większa zawartość grafitu występuje w obszarach brzegowych-boki i dół odlewu-DO, a także w warstwie wierzchniej, a mniejsza w środku. Obróbka cieplna żeliwa nie zmienia w sposób istotny tego rozkładu. Bardziej jednorodna pod względem rozkładu grafitu (wartość współczynnika k_N mniejsza) jest warstwa wierzchnia odlewu niż jego środek i to zarówno w stanie surowym jak i po wyżarzaniu ujednorodniającym;
- zawartość ferrytu w stanie surowym żeliwa jest większa w górnych partiach odlewu - przy nadlewie (GO), oraz w warstwie wierzchniej próbnego wlewka aniżeli w jego środku. Po obróbce cieplnej sytuacja ta ulega odwróceniu tj. większą zawartość ferrytu obserwuje się w dolnych obszarach odlewu (szczególnie w narożach) a jego zawartość w środku wlewka jest nieco wyższa niż w warstwie wierzchniej, co potwierdzałyby wyniki otrzymane przez autorów opracowania [11]. Wyżarzanie zmniejsza w decydujący sposób zawartość ferrytu oraz poprawia dwukrotnie niejednorodność rozkładu tego składnika, przy czym środek odlewu jest pod tym względem bardziej jednorodny;
- zawartość cementytu wtórnego jest zawsze większa w warstwie wierzchniej odlewu aniżeli w środku, a szczególnie duża jego zawartość występuje w dolnych narożach. Wyżarzanie zmniejsza dwukrotnie zawartość cementytu, lecz w pewnych przypadkach, zwłaszcza w żeliwie nr 1, zaobserwowano zwiększenie zawartości cementytu (przez powstanie nowych ziaren) w obszarach, w których nie występował on w stanie surowym. Zjawisko to potwierdzają wyniki badań opisane w pracach [12,13]. Wyżarzanie poprawia wyraźnie niejednorodność rozłożenia cementytu zarówno w jego środku jak i w warstwie wierzchniej odlewu, przy czym bardziej jednorodny pod względem rozkładu cementytu jest środek odlewu;

- d) wzrost zawartości manganu w żeliwie sferoidalnym oraz zwiększona zawartość w nim chromu (żeliwo nr 3) nie wpływa na rozkład zawartości grafitu w żeliwie i nie zmienia w sposób istotny jednorodności jego rozmieszczenia zarówno w stanie surowym jak też po ujednorodnieniu, natomiast powoduje pogorszenie jednorodności dla ferrytu i cementytu wtórnego zarówno w środku, jak i w warstwie wierzchniej odlewu (silniej w warstwie wierzchniej). Wzrost zawartości manganu i dodatkowo zawartości chromu powoduje także wzrost zawartości cementytu wtórnego, a zmniejszenie zawartości ferrytu zarówno w stanie surowym, jak i po wyżarzaniu;
- e) dopuszczając 20% różnice w wartościach obliczonych współczynników k_N określających rozmieszczenie grafitu i ferrytu w osnowie żeliwa oraz 40%-dla cementytu wtórnego, dla doboru optymalnego pod względem jednorodności rozmieszczenia struktury i najekonomiczniejszego z punktu widzenia oszczędności materiału, wariantu okrojenia odlewu próbnego z żeliwa sferoidalnego, można stwierdzić (tab.4), że najbardziej jednorodne obszary pod względem rozkładu składników strukturalnych otrzymuje się dla:
- żeliwa z małą zawartością manganu (do 0,69%)-odcinając w stanie surowym po 10mm z brzegów i 5mm z dołu odlewu (linia ciągła na rys.8),
 - żeliwa ze zwiększoną zawartością manganu (do 1,22%) i dodatkowo chromu (do 0,25%) - odcinając w stanie surowym po 15mm z brzegów i 10mm z dołu odlewu (linia przerywana kropkowa na rys.8),
 - żeliwa po wyżarzaniu ujednorodniającym, zmniejszając podane powyżej wartości w stosunku do stanu surowego dwukrotnie (linia przerywana na rys.8), przy czym podane wyższe wartości okrojenia odnoszą się dla zwiększonej zawartości Mn i Cr w żeliwie.

4. STWIERDZENIA KOŃCOWE

Na podstawie otrzymanych wyników badań i ich analizy można wysunąć następujące wnioski:

1. Zaproponowany w pracy współczynnik k_N może stanowić dobrą miarę ilościowej oceny niejednorodności strukturalnej osnowy metalicznej w badanych odlewach próbnych.
2. Ilościowe rozmieszczenie ferrytu i cementytu w odlewach próbnych z żeliwa sferoidalnego jest bardziej równomierne w środku odlewu niż na jego powierzchni, a struktura bardziej jednorodna w tej części odlewu. W stosunku do grafitu występuje sytuacja odwrotna.
3. Wyżarzanie ujednorodniające poprawia prawie dwukrotnie równomierność rozłożenia i jednorodność rozkładu ferrytu i cementytu w odlewach próbnych w stosunku do stanu surowego, nie powoduje tych zmian dla grafitu.
4. Wzrost w niestopowym żeliwie sferoidalnym manganu do (1,22%) i chromu (do 0,25%) zarówno po wyżarzaniu ujednorodniającym, jak i w stanie surowym prowadzi do zwiększenia niejednorodności strukturalnej odlewu dla ferrytu i cementytu zarówno na powierzchni, jak i w środku odlewu, natomiast nie wpływa w istotny sposób na rozmieszczenie grafitu.

5. Wyżarzanie ujednorodniające odlewów próbnych z niestopowego żeliwa sferoidalnego zmniejsza znacznie ilość cementytu wtórnego w stosunku do stanu surowego, a także powoduje też występowanie jego w obszarach, w których nie występował w stanie surowym.
6. W celu wycięcia z klina odlewu próbnego w stanie surowym możliwie najbardziej jednorodnych obszarów pod względem rozkładu struktury, należy po odcięciu nadlewu usunąć po 10mm odlewu od strony jego brzegów i 5mm z dołu odlewu, gdy w żelwie jest do 0,69 Mn, a przy jego wroście do 1,22% i dodatkowej zawartości chromu do 0,25%, powyższe wartości należy zwiększyć o 5mm. W przypadku przeprowadzenia wyżarzania ujednorodniającego, podane powyżej wartość można zmniejszyć dwukrotnie.

5. LITERATURA

- [1] Piaskowski J.: Wpływ szybkości stygnięcia na strukturę i własności mechaniczne żeliwa sferoidalnego perlitycznego i ferrytycznego. Prace Inst. Odlewnictwa, 1975, nr 1, s.3.
- [2] Gietman A., Snopkow S.: Makro i mikrotwierdost powierzchniowych słojev otlivok iz vysokokacestwiennogo czuguna. Metall. i Term. Obr. Metali., 1968, nr 5, s.56.
- [3] Żukow A.: Strukturnyje anomalii w sjerom czugunie. Lit.Proizv., 1957, nr 12, s.16.
- [4] Malinocka Ja.N.: Niekotoryje anomalii makro i mikrostruktury czugunnych otlivok. Lit.Proizv. 1963, nr 12, s.22.
- [5] Piaskowski J., Jankowski A.: Żeliwo sferoidalne. Wyd.II WNT, Warszawa 1974.
- [6] Lewitan M.M.: Usłowija poluczenija otlivok iz magniewogo czuguna bez piewicznogo cementita. Lit.Proizv., 1963, nr 6, s.8.
- [7] Zarubin N.M.: Issledowanije nieodnorodnosti magniewogo czuguna. Lit.Proizv., 1959, nr 2, s.40.
- [8] Zarubin N.M.: Issledowanije nieodnorodnosti magniewogo czuguna. Lit. Proizv. 1961, nr 5, s.27.
- [9] Meyer H., Hammerli F.: Produkcja wysokojakościowego żeliwa sferoidalnego doświadczenia praktyczne i wyniki badań. Prz.Odlewnictwa, 1972, nr 2, s.56.
- [10] Gilbert G.N., Mech M.J.: Review of recent work on the mechanical properties of nodular cast iron. Foundry Trade Journal.1996, t.120, nr 2580, s.667.
- [11] Szykowny T., Oleszycki H.: Struktura i twardość normalizowanego żeliwa sferoidalnego przy zmiennej grubości ścianek odlewu. Pr.Wydz. Nauk.Techn. BTN, Mechanika 1981, ser.B, nr 13, s.59.
- [12] Oleszycki H.: Rola zabiegów cieplnych w kształtowaniu struktury perlitycznej i własności mechanicznych niestopowego żeliwa sferoidalnego. Zeszyty Nauk. ATR, Bydgoszcz 1982, Rozprawy nr 7.
- [13] Oleszycki H., Sadowski J.: Wpływ sposobu nagrzewania i chłodzenia oraz czasu wygrzewania na ilość cementytu wtórnego w niestopowym żelwie sferoidalnym. Zeszyty Nauk. ATR, Bydgoszcz 1979, Mechanika nr 21, s.49.

- [14] Harris D.A., Maitland R.J. The products of the isothermol decomposition of austenite in a spheroidal graphite cast iron. Iron and steel, 1970, nr 1, s.53.
- [15] Okumoto T. i in.: Improving the mechanical properties of perlitic ductile Iron by two-step normalizing. Trans.Amer. Foundrymen Soc.,1971, s.473.
- [16] Volk N.: Statystyka matematyczna dla inżynierów. PWNT, Warszawa 1975.
- [17] Rys J.: Wstęp do metalografii ilościowej. Wyd. Śląsk, Katowice 1970.
- [18] Helwig Z.: Elementy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. PWN, 1978.

THE STRUCTURAL ANISOTROPY OF NON-ALLOY SPHEROIDAL CASTIRON TEST INGOST

Summary

In this paper the structural anisotropy of non-alloy spheroidal cast-iron depended on chemical constitution, surface defects and initial state condition is described.

Experimental results have led to conclude that chemical constitution, surface defects and initial state condition have an effect on the graphite, ferrite and cementite distribution in cast-iron. The rate of the structural anistropy of non-alloy spheroidal cast is proposed.

KONSTRUKCYJNA ANALIZA PRZYRZĄDU DO WYKRAWANIA OTWORÓW O MAŁYCH ŚREDNICACH W LAMINATACH

Zygmunt Stankiewicz*, Michał Styp-Rekowski**

Wydział Mechaniczny

*Katedra Materiałoznawstwa i Technologii Maszyn

ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

**Katedra Obrabiarek i Robotów

ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz

W artykule omówiono konstrukcyjne aspekty wykrawania otworów w laminatach stosując do tego celu obróbkę plastyczną. Wykorzystując wyniki przeprowadzonej analizy konstrukcyjnej opracowano i wykonano wykrojnik. Przeprowadzona weryfikacja doświadczalna wykazała, że posiadał on oczekiwane cechy eksploatacyjne (duża wydajność), a uzyskane produkty były, zgodnie z założeniami, wysokiej jakości.

Słowa kluczowe: wykrojnik, konstrukcja, laminat

I. WSTĘP

Laminaty należą do warstwowych tworzyw kompozytowych. Stosowane między innymi w przemyśle elektronicznym do produkcji wielowarstwowych obwodów drukowanych składają się z nośnika i jednej lub kilku, a nawet kilkunastu warstw przewodzących. Nośnik laminatu to obecnie najczęściej papier celulozowy lub tkanina szklana nasycona żywicą: fenolowo-formaldehydową, epoksydową, poliestrową. Rodzaj nośnika decyduje o własnościach mechanicznych laminatów; w istotny sposób rzutuje też na możliwości ich obróbki i wykorzystania.

Dynamiczny rozwój elektroniki znajduje swoje odbicie w technologii obwodów drukowanych. Miniaturyzacja elementów elektronicznych powoduje, że problemy z zakresu technologii dotyczą głównie następujących zagadnień:

- zmniejszenia średnic otworów,
- zmniejszenia odległości między nimi,
- poprawy dokładności położenia otworów (dotyczy to głównie obwodów wielowarstwowych).

Dwuwarstwowe (liczy się ilość warstw przewodzących) obwody drukowane mają łączną grubość od 0,5 do 2,0 mm, w tym miedziana warstwa przewodząca o grubości 17, 24, 35 lub 70 μm . Przyjmuje się, że minimalna średnica otworów wykrawanych za pomocą obróbki plastycznej w stali jest określona zależnością:

$$d_{\min} = 0,8g. \quad (1)$$

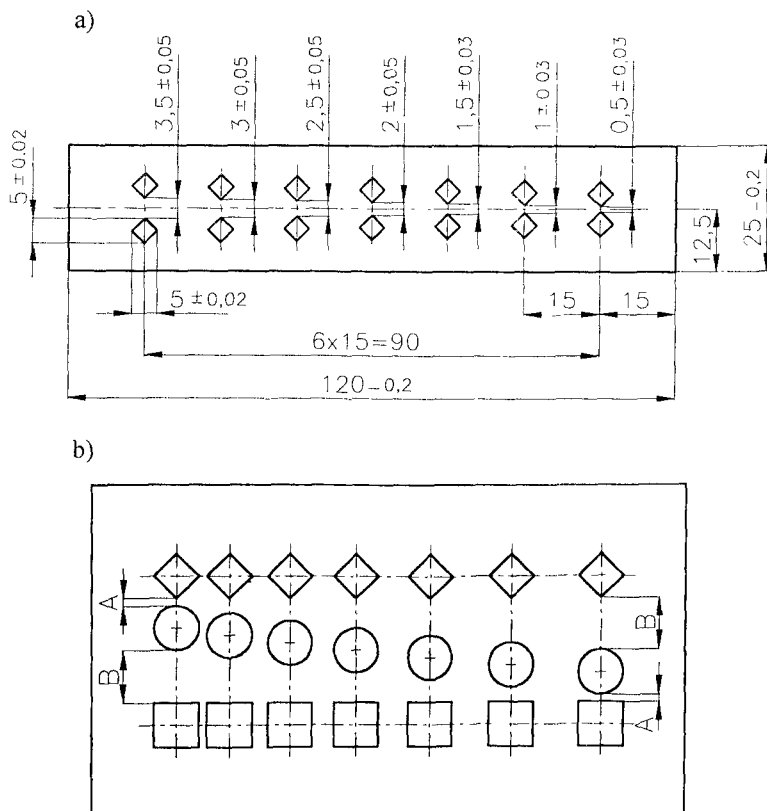
Dla laminatów zależność ta ma postać:

$$d_{\min} = 0,66g. \quad (2)$$

więc otwory, które wykonywane są w obwodach drukowanych, mają średnice od 0,3 mm. Ze względu na potrzeby wartości te bywają zbyt duże i z tego też powodu bardzo często poszukuje się innych metod obróbki laminatów.

Minimalne odległości, jakie są niezbędne do uzyskania pomiędzy otworami, zależą głównie od rodzaju nośnika i rodzaju obróbki. W przypadku obróbki plastycznej określa się je doświadczalnie, wykonując szereg par otworów o określonych kształtach i średnicach, przy coraz mniejszych odległościach pomiędzy kolejnymi parami otworów i stwierdzeniu, przy jakiej odległości przegroda zostaje uszkodzona.

Procedura badania wykrawalności określona jest w normach krajowych, np.: w normie polskiej PN- 82/C-89003, a wybrane schematy próbek do jej określania przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowe schematy próbek do badania wykrawalności:
a) wg normy polskiej, b) wg normy brytyjskiej

Normy różnych krajów dotyczące określania wykrawalności przewidują otwory o zróżnicowanych kształtach i rozmieszczeniu, co widoczne jest również na powyższym

rysunku. Im bardziej różnorodne są kształty, wymiary i rozmieszczenie otworów w testowych próbkach, tym informacje uzyskane w rezultacie przeprowadzenia prób są pełniejsze i dokładniejsze.

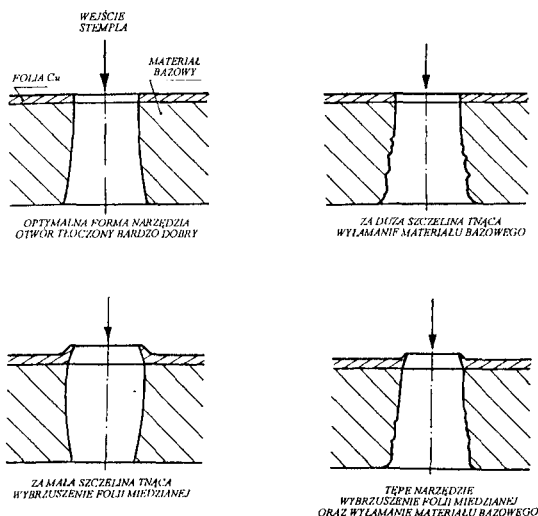
2. CZYNNIKI WARUNKUJĄCE PRAWIDŁOWĄ REALIZACJĘ PROCESU TECHNOLOGICZNEGO

Właściwa realizacja przyjętego procesu technologicznego to podstawowy warunek uzyskania otworów o wymaganych cechach konstrukcyjnych, a tym samym i obwodów drukowanych o założonych cechach użytkowych.

Dokładność położenia wykonanych otworów, najczęściej decydująca o jakości obwodów drukowanych, związana jest z przyjętą postacią konstrukcyjną wykrojnika i oczywiście z dokładnością jego wykonania. Odchyłki makro- i mikrogeometrii otworów, mające również znaczenie przy ocenie jakości obwodów, zależą w głównej mierze od czynników technologicznych w przyjętym procesie wytwarzania [1]. W mniejszym stopniu, jednak również, zależne są one od czynników konstrukcyjnych. Najczęściej występujące błędy otworów wykonanych w laminatach za pomocą obróbki plastycznej spowodowane czynnikami związanymi z narzędziem przedstawiono na rysunku 2. Należą do nich:

- wykruszenia i wyłamania materiału nośnika,
- rozwarstwienie warstw nośnika i folii przewodzącej.

Omawiając możliwe błędy mikrogeometrii otworów wykonywanych za pomocą obróbki plastycznej należy wspomnieć jeszcze o często występującym błędzie uzyskanego kształtu. Wynika on z nierównomiernego zużywania się narzędzi i wywołanego tym nierównomiernego rozłożenia luzu tnącego.



Rys.2. Przykładowe wady otworów wykonywanych w laminacie za pomocą obróbki plastycznej

Inne wady występujące przy obróbce plastycznej warstwowych obwodów drukowanych to:

- wybrzuszenie zewnętrznej warstwy folii metalicznej,
- pęknięcia i ubytki nośnika.

Są to wady, których przyczyna tkwi głównie w tworzywie, lecz przy projektowaniu przyrządu do obróbki laminatów należy również o nich pamiętać.

Możliwość plastycznej obróbki obwodów drukowanych należy brać pod uwagę już na etapie projektowania płytki. Należy pamiętać, że ten rodzaj obróbki wymaga uwzględnienia pewnych warunków, których zapewnienie jest niezbędne, aby obróbka plastyczna była możliwa do zastosowania i konkurencyjna dla innych metod. Główne z nich to:

- średnice otworów, odległości otworów od siebie lub od krawędzi; minimalne wartości tych wielkości określane są przez poszczególnych producentów doświadczalnie, zależnie od rodzaju laminatu oraz od jego grubości [5,6],
- rozmieszczenie otworów na powierzchni płytki - nieuwzględnienie tego warunku może powodować, że przyrząd będzie duży, zwiększy tym samym jego koszt.

Wymienione w tej części czynniki nie wyczerpują oczywiście wszystkich aspektów związanych z przyrządem i procesem technologicznym, które należy uwzględnić przy jego projektowaniu i konstruowaniu, są jednak zdaniem autorów najistotniejszymi z nich. Pominięcie któregoś z nich praktycznie uniemożliwia prawidłową realizację założonego procesu technologicznego.

3. WYBRANE ZAGADNIENIA UWZGLĘDNIANE PRZY KONSTRUOWANIU WYKROJNIKA

3.1. Prowadzenie stempli

Jednym z podstawowych warunków prawidłowego działania wykrojnika, gwarantującym uniknięcie typowych błędów wykonania otworów - rysunek 2, jest zapewnienie prawidłowego prowadzenia jego ruchomych elementów roboczych - stempli. Prawidłowe wzajemne położenie stempla i matrycy zapewnia równomierną na całym obwodzie szczelinę. Niezapewnienie tego warunku powoduje zakłócenie równowagi sił będące przyczyną błędów kształtu, a w skrajnym przypadku nawet uszkodzenia krawędzi tnących stempla lub matrycy.

Realizacja tego warunku jest możliwa przy zastosowaniu ruchomej płyty prowadzącej. Takie rozwiązanie zapewnia powiązanie prowadzenia pośredniego słupowego z bezpośrednim prowadzeniem stempla w płycie prowadzącej. Występuje więc przypadek prowadzenia mieszanego. W przypadku ruchomej płyty prowadzącej mamy do czynienia z jej działaniem synergetycznym. Oprócz prowadzenia stempla, spełnia ona jeszcze funkcję płyty dociskającej materiał obrabiany do matrycy oraz funkcję płyty psyczącej ten materiał ze stempla.

Podsumowując tę część rozważań, należy stwierdzić, że dobry układ prowadzący powinien charakteryzować się następującymi cechami:

- współosiowością otworów prowadzących i otworów tnących w matrycy,

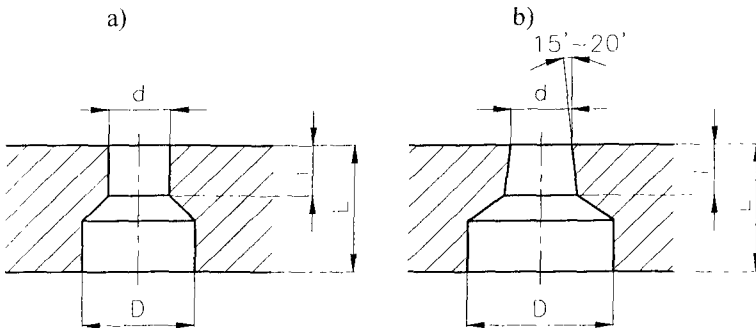
- właściwym stosunkiem l/d połączeń pasowanych (rzutuje to na przyjmowaną grubość płyty prowadzącej) zapewniającym właściwy, założony charakter tych połączeń (spoczynkowe lub ruchowe),
- równoległość osi wszystkich stempli (gdy występuje ich więcej, a tak jest zawsze przy obróbce plastycznej obwodów drukowanych).

Istotne jest także zapewnienie trwałości wyżej wymienionych cech, co można uzyskać na przykład przez użycie hartowanych wkładek prowadzących lub stosując typowe, znormalizowane prowadnice toczne [8].

3.2. Matryce tnące

Drugim niewłaściwym miejscem wykrojnika jest zespół stempli i matrycy. Dla jakości wykrawanych otworów duże znaczenie ma kształt otworu roboczego, dokładniej zaś - jego przekrój wzdłużny. W stosowanych do tego celu wykrojnikach występują najczęściej otwory o geometrycznych cechach konstrukcyjnych przedstawionych na rysunku 3. W otworze przedstawionym na rysunku 3a wyróżnić można trzy odcinki:

- cylindryczny o długości nieco większej (o $0,5 \div 1,0$ mm) niż grubość obrabianego laminatu,
- część stożkową o długości zbliżonej do długości odcinka cylindrycznego,
- część cylindryczną, której długość jest wynikową grubości matrycy oraz długości dwóch pierwszych odcinków.



Rys. 3. Przekrój wzdłużny przez otwór tnący: a) otwór walcowy, b) otwór stożkowy

Takie ukształtowanie otworu, zalecane na przykład przez firmę BAKELITE [4], powoduje zmniejszenie ilości pyłu, jaki powstaje podczas procesu wycinania, który (pył) przyczynia się do zakleszczania się stempli w otworach. Przy małych średnicach stempli jest to zjawisko bardzo niepożądane, mogące nawet doprowadzić do zniszczenia tego elementu narzędzia.

Druga wersja otworu roboczego przedstawiona jest na rysunku 3b. Podobnie jak w wersji pierwszej w przekroju wzdłużnym występują trzy odcinki, z tym że w tej wersji odcinek pierwszy jest stożkowy o kącie pochylenia rzędu kilkunastu minut. Wartość tego kąta zależy od grubości obrabianego laminatu i średnicy obrabianych otworów [6].

Nieznaczne pochylenie ścianek otworu powoduje wyraźną poprawę efektywności procesu wytwarzania w wyniku:

- zmniejszenia siły tnącej, gdyż stempel nie pokonuje siły tarcia o ścianki boczne otworu,

- zwiększenia trwałości matrycy, ponieważ otwór nie wyciera się w pobliżu krawędzi tnącej,
- zwiększenia prędkości wykrawania - odpad nie wraca ze stemplem.

Ponieważ pierwszy odcinek otworu tnącego jest stożkowy, luz pomiędzy stemplem a matrycą, w wyniku jej ostrzenia, powiększa się. Z tego względu konstruując wykrojnik z otworami o tej postaci należy założyć luz mniejszy niż dla otworów walcowych.

Zagadnienie luzu w wykrojnikach jest również bardzo istotne dla jakości otrzymanych otworów, a także dla żywotności narzędzia. Omawiane zagadnienie jest szczególnie istotne dla obróbki laminatów, gdyż własności lepkosprężyste tworzyw warstwowych powodują trudności w uzyskaniu otworów o wysokich dokładnościach w zakresie mikrotechnologii. Dlatego też do obróbki obwodów drukowanych, w elektronice stosowane są już obwody o kilkunastu warstwach, stosuje się inne rodzaje obróbek [1]. Automatyzacja wprowadzana w montażu stawia również coraz wyższe wymagania w zakresie dokładności rozmieszczenia otworów w płytce obwodów wielowarstwowych.

4. WYKROJNIK DO OBRÓBKI OBWODÓW DRUKOWANYCH

Przedstawione powyżej aspekty, głównie konstrukcyjne, uwzględnione zostały w praktyce przy projektowaniu wykrojnika służącego do jednoczesnego wykrawania kształtu zewnętrznego płytki i dziurkowania warstwowych obwodów drukowanych wytwarzanych w Zakładach Elektronicznych TORAL w Toruniu [3]. Postać konstrukcyjną wykrojnika służącego do tego celu przedstawiono na rysunku 4.

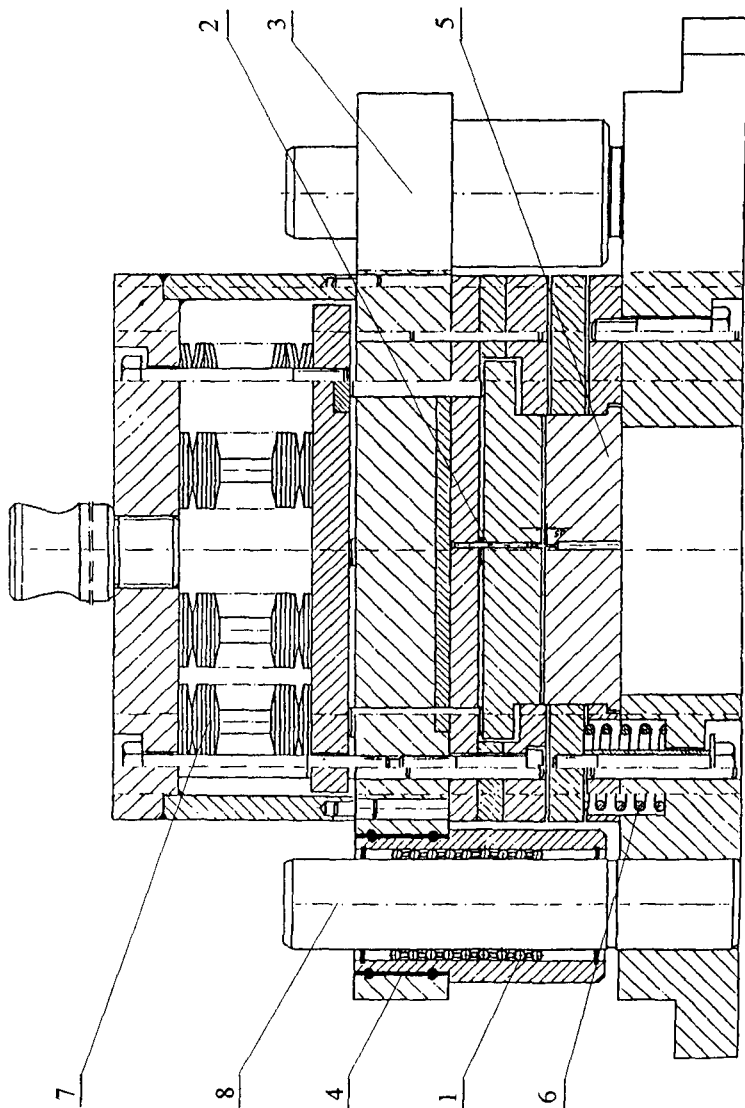
Dla zapewnienia dokładności prowadzenia w wykrojniku zastosowano prowadnice kulkowe (1). W celu ich zabezpieczenia przed pyłem, na górnych końcach słupów prowadzących umieszczono osłony mieszkowe (nie pokazane na rysunku 4). Ponadto co określona liczbę godzin pracy wykrojnika przewidziano przedmuchiwanie zestawów kulkowych sprężonym powietrzem.

Stemple wykrawające (2) w omawianym wykrojniku są krótsze niż w rozwiązaniach konstrukcyjnych przyrządów stosowanych dotychczas do obróbki, co powoduje zwiększenie ich trwałości (mniejszy stosunek l/d). Zabieg ten wywołał z kolei konieczność użycia krótszych słupów prowadzących (8) i specjalnego montażu prowadnic (1) z płytą ustalającą (3). W tym konkretnym wykrojniku montaż polega na połączeniu tych elementów za pomocą żywicy epoksydowej (4).

Do usuwania ażuru ze stempla dolnego (5) zastosowano układ zrzucający składający się z ośmiu sprężyn śrubowych (6), a do zdejmowania obrobionych detali ze stempla użyto zespołu sprężyn krążkowych (7).

W rozwiązaniu konstrukcyjnym prezentowanego wykrojnika w małym jedynie stopniu uwzględniono zagadnienie stosowania znormalizowanych elementów narzędziowych. Zastosowanie elementów lub całych zespołów znormalizowanych, których obszerny zbiór zawierają Polskie Normy (np. oprawy, skrzynki, płyty, czopy, słupy, tuleje, stemple, matryce itd.) [8] powoduje znaczące uproszczenie procesu konstruowania, umożliwiając w dużym stopniu komputerowe wspomaganie tego procesu (CAD).

Stosowanie zespołów i elementów znormalizowanych z przyczyn oczywistych prowadzi także do obniżenia kosztów wytworzenia wykrojnika.



Rys. 4. Postać konstrukcyjna wykojnika do okrawania i dziurkowania obwodów drukowanych
(objaśnienia odnośników w tekście)

Uwzględnienie tego zagadnienia przy projektowaniu opisywanego wykrojnika w minimalnym tylko stopniu wynikało z faktu, że podstawowym celem pierwszego etapu niniejszej pracy było sprawdzenie przyjętych założeń konstrukcyjnych i technologicznych poprzez doświadczalną weryfikację prototypu wykrojnika. Optymalizacja postaci konstrukcyjnej przyrządu, a także procesu jego wytwarzania, przewidziana była jako kolejny etap pracy (pod warunkiem uzyskania pozytywnych rezultatów etapu pierwszego).

Wykrojnik o przedstawionej wyżej postaci konstrukcyjnej zastosowany w praktyce zastąpił trzy przyrządy: dwa dziurkowniki i okrojnik dotychczas używane w procesie wytwórczym tych obwodów.

Jak już wcześniej stwierdzono, wykonany wykrojnik służył jedynie do doświadczalnej weryfikacji przyjętych na etapach projektowania i konstruowania założeń i dlatego w niniejszym artykule nie ustosunkowano się do równie ważnych jak konstrukcyjne - zagadnień trwałościowych. Dopiero wyniki uzyskane za pomocą opisanego wykrojnika będą podstawą do wniosków o charakterze trwałościowym i niezawodnościowym.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone próby wykazały, że prawidłowe metodycznie podejście do problemu zaspokajania potrzeby na etapie projektowania i konstruowania wykrojnika, a także zapewnienie dokładności jego wykonania, umożliwiło uzyskanie przyrządu o cechach konstrukcyjnych pozwalających realizować efektywnie obróbkę laminatów w skali masowej. Zastosowanie tego wykrojnika w Zakładach Elektronicznych TORAL według wstępnych szacunków pozwoliło zmniejszyć koszty jednostkowe obrabianych obwodów o około 50% przy zachowaniu niezbędnych dokładności w zakresie makro- i mikrogeometrii wykonanych otworów (dla obrabianego rodzaju obwodów drukowanych wystarczająca jest dokładność w klasie IT8).

pozytywne rezultaty uzyskane dzięki zastosowaniu obróbki plastycznej do obróbki warstwowych obwodów drukowanych nie zwalniają jednak z prowadzenia dalszych analiz i badań służących poszukiwaniom dokładniejszych i efektywniejszych sposobów obróbki, w tym także tradycyjnych [2,7].

LITERATURA

- [1] Budzyński A. F., Wocianiec R., Zdrojewski J., Bujnowski S.: Wideokomputerowa korekta współrzędnych położenia otworów w wielowarstwowych obwodach drukowanych. Materiały konferencji PPT'95 (Projektowanie Procesów Technologicznych), Poznań - Czerniejewo 1995.
- [2] Hidetoshi Y.: Vibro-punching of Epoxy Glass. Wining Board, Tokyo 1988.
- [3] Jastrzemski J.: Wykonywanie otworów o małych średnicach w laminatach szklanoepoksydowych i fenylowych foliowanych miedzią metodą wykrawania. ATR, Bydgoszcz 1989 (nie publikowane).
- [4] Materiały firmy BAKELITE Ltd.: Wykrawanie laminatów foliowanych miedzią.

- [5] Materiały firmy ISOVOLTA: Produkcja obwodów drukowanych w technice sub-straktywnej i addytywnej.
- [6] Materiały firmy WELKE-Stanztechnik: Liefer Programm.
- [7] Roguszcak J., Sikora R.: Badania zużycia ostrza podczas wiercenia laminatów epoksydowo-szklanych na płytki z połączeniami drukowanymi. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn nr 2/1976.
- [8] Tomaszewski Z.: Narzędzia znormalizowane w tłocznictwie. Materiały VI Krajowej Konferencji N-T „Problemy narzędziowe w obróbce plastycznej” ATR, Bydgoszcz – Pieczyska 1997.

CONSTRUCTIONAL ANALYSIS OF SMALL DIAMETER HOLES PIERCING IN LAMINATE

Summary

In the paper constructional aspects of piercing of small diameter holes in laminate is discussed. The piercing die made with regard worked out guidelines have expect operating features. Experimental verification shows that the products made using this piercing die had got high-quality with high efficiency of described manufacturing process.

WPLYW WŁASNOŚCI REOLOGICZNYCH MEDIUM SMARNEGO NA PRACĘ ŁOŻYSK ŚLIZGOWYCH ROLEK NOŚNYCH PIECÓW CEMENTOWYCH

Maciej Świtalski, Janusz Zachwieja

Wydział Mechaniczny ATR
Katedra Mechaniki Stosowanej
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pracy zwrócono uwagę na istotną rolę własności reologicznych medium smarnego na prawidłową pracę łożyska ślizgowego. Zależność lepkości płynu o własnościach nienewtonowskich od szybkości ścinania powinna być jednym z głównych kryteriów przy doborze oleju dla przepływu szczelinowego z efektem klina smarnego. Zapewnia to prawidłową pracę rolki dzięki odpowiednio dużej nośności łożysk ślizgowych.

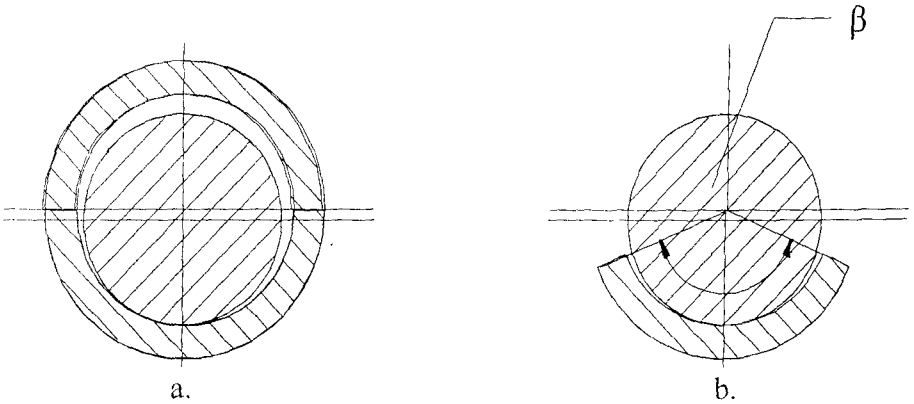
Słowa kluczowe: łożyska ślizgowe, walczaki obrotowe.

Oznaczenia

V_1, V_ϕ	- składowe prędkości przepływu w szczelinie,
μ	- lepkość dynamiczna,
p	- ciśnienie statyczne,
ξ, ϕ	- współrzędne biegunowe,
R	- promień czopa,
R^*	- promień panewki,
T	- tensor naprężenia,
ω	- prędkość wirowania czopa,
\underline{A}_1	- kinematyczny tensor Rivlina-Ericsena, $\underline{A}_1 = \nabla \bar{v} + (\bar{v} \bar{v})'$
\underline{I}	- tensor jednostkowy.

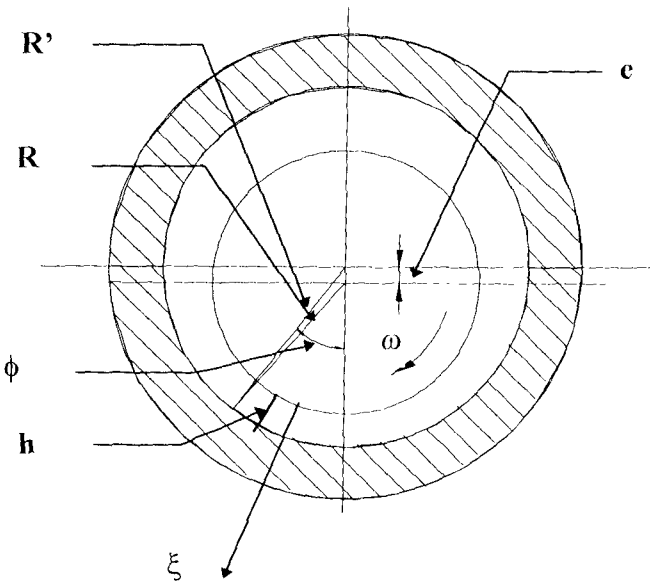
1. WSTĘP

Czopy rolek nośnych pieców wapienniczych i cementowych z uwagi na znaczne naciski osadzane są w panewkach łożysk ślizgowych. Podczas obrotu rolki, dzięki odpowiedniej geometrii czopa i panewki występuje zjawisko tzw. „klina smarnego”, czyli gwałtowny wzrost ciśnienia w miejscu styku czopa z panewką. Na czop działa wówczas siła nośna zmniejszająca jego nacisk na panewkę, a tym samym ograniczająca siłę tarcia w łożysku.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie odmian ślizgowych łożysk poprzecznych
a. kąt opasania $\beta=2\pi$, b. kąt opasania $\beta<\pi$

Panewki w łożyskach rolek nośnych posiadają zazwyczaj kąt opasania $\beta \leq \pi$, a ich płaszczyzna symetrii jest pochylona pod kąt $\pi/6$ do pionu, co zapewnia optymalny rozkład nacisków przy kącie wierzchołkowym pieca równym $\pi/3$ [1].



Rys. 2. Schemat konfiguracji przepływu medium w łożysku o kącie opasania $\beta = 2\pi$

Równania ruchu płynu przy uproszczeniach Reynoldsa dla konfiguracji przepływu jak na rys.2. przedstawiają się następująco:

$$\begin{aligned}\mu \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \xi^2} &= \frac{1}{R} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \\ \mu \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} &= \frac{\partial p}{\partial r} \\ \frac{\partial \mathcal{N}_r}{\partial \xi} + \frac{1}{R} \frac{\partial \mathcal{N}_\varphi}{\partial \varphi} &= 0\end{aligned}\quad (1.1)$$

Rozwiązanie równań (1.1) nie przedstawia większej trudności pod warunkiem, że lepkość ośrodka wyrażana współczynnikiem μ jest stała. W praktyce warunek ten nigdy nie jest spełniony, ponieważ lepkość zależna jest zarówno od temperatury, jak i od szybkości ścinania wyrażanej za pomocą kinematycznych tensorów deformacji tworzonych z gradientów prędkości [2]. Dla określenia rzeczywistej nośności łożyska nie można pominąć wpływu temperatury na lepkość oleju wskutek występowania zjawiska wymiany ciepła przez ścianki. Podobnie istotne jest uwzględnienie zmian lepkości w funkcji szybkości ścinania dla mediów smarnych, które są płynami nienewtonowskimi.

Próba obejścia tych trudności jest przyjęcie założenia, że medium smarne jest płynem newtonowskim, w którym związek między naprężeniem i szybkością ścinania jest stały.

2. ROZWIĄZANIE DLA PŁYNU NEWTONOWSKIEGO

Przyjmując dodatkowe oznaczenia:

$$\begin{aligned}0 &\leq \xi \leq h, \\ \varepsilon &= R' - R, \\ \lambda &= \frac{e}{\varepsilon}, \\ h(\varphi) &= \varepsilon - \varepsilon \cos \varphi = \varepsilon(1 - \lambda \cos \varphi),\end{aligned}\quad (2.1)$$

otrzymujemy z rozwiązania równań ruchu [3] wyrażenia określające:

1) prędkość przepływu w szczelinie

$$V_\varphi = \frac{1}{2\mu R} \frac{dp}{d\varphi} (\xi - h)\xi + \frac{\omega R}{h} (h - \xi), \quad (2.2)$$

2) naprężenie ścinające na ścianie czopa

$$\tau_w(\varphi) = \frac{2\mu\omega R}{\varepsilon(1 - \lambda \cos \varphi)} \left[\frac{3(1 - \lambda^2)}{(2 + \lambda^2)(1 - \lambda \cos \varphi)} - 2 \right], \quad (2.3)$$

3) rozkład ciśnienia w szczelinie

$$p(\phi) = \frac{6\mu\omega R^2}{\varepsilon^2} \left(S_2(\phi, \lambda) - \frac{2(1-\lambda^2)}{2+\lambda^2} S_3(\phi, \lambda) \right), \quad (2.4)$$

gdzie:

$$S_2(\phi, \lambda) = \frac{2}{(1-\lambda^2)^{\frac{3}{2}}} \arctg \left(\sqrt{\frac{1+\lambda}{1-\lambda}} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right) + \frac{\lambda}{1-\lambda^2} \frac{\sin \phi}{1-\lambda \cos \phi},$$

$$S_3(\phi, \lambda) = \frac{2+\lambda^2}{(1-\lambda^2)^{\frac{5}{2}}} \arctg \left(\sqrt{\frac{1+\lambda}{1-\lambda}} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right) + \frac{3}{2} \frac{\lambda}{(1-\lambda^2)^2} \frac{\sin \phi}{1-\lambda \cos \phi} + \frac{1}{2(1-\lambda^2)} \frac{\sin \phi}{(1-\lambda \cos \phi)^2}. \quad (2.5)$$

3. WŁASNOŚCI REOLOGICZNE MEDIÓW SMARUJĄCYCH

Rozwiązania równań ruchu podane w pkt. 3. dotyczą płynów newtonowskich, tj. takich, dla których równania konstytutywne można przedstawić w postaci [4]:

$$\begin{aligned} \underline{T} &= -p\underline{1} + \mu \underline{A}_1, \\ \operatorname{tr} \underline{A}_1 &= 0. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Z równania (3.1) można wywnioskować proporcjonalną dla płynów newtonowskich zależność pomiędzy tensorem deformacji a tensorem naprężeń. Rolę współczynnika proporcjonalności pełni współczynnik lepkości dynamicznej, która jest z założenia stała.

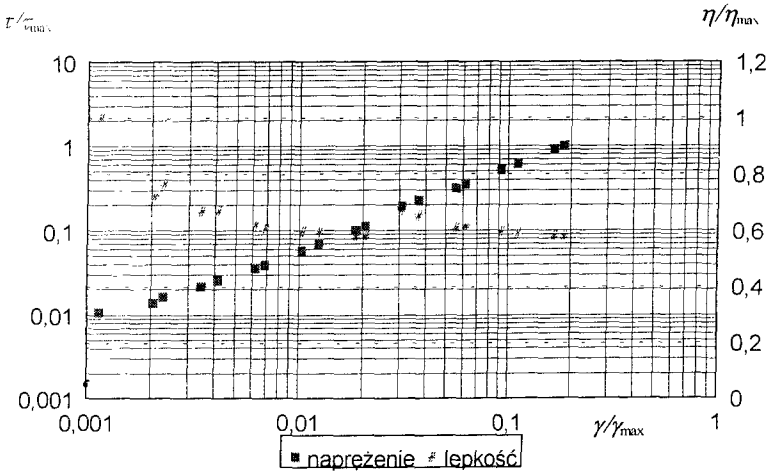
Tymczasem z rysunków 3 i 4 widać, że w przypadku rzeczywistego medium smarnego jego lepkość uzależniona jest nie tylko od temperatury, ale także od szybkości ścinania, która jest funkcją zarówno kąta ϕ , jak również współrzędnej szczelinowej ξ (rys.5).

Niekiedy rozbudowuje się model ośrodka poprzez dodawanie nowych członów w równaniach (3.1), dających nieliniową zależność pomiędzy tensorami naprężenia i odkształcenia [5], ale w takich przypadkach ostateczną trudnością jest podanie wartości i metody wyznaczania lepkości dodatkowych.

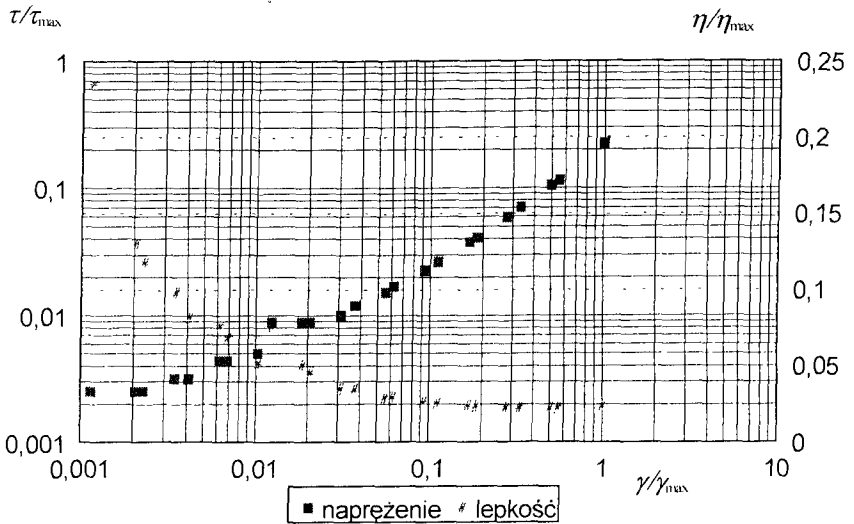
Ninewtonowski charakter medium smarnego uwidacznia się w szerokim zakresie szybkości ścinania w miarę wzrostu temperatury. Przyjmując potęgową zależność pomiędzy naprężeniem i szybkością ścinania:

$$\tau = \gamma^n \quad (3.2)$$

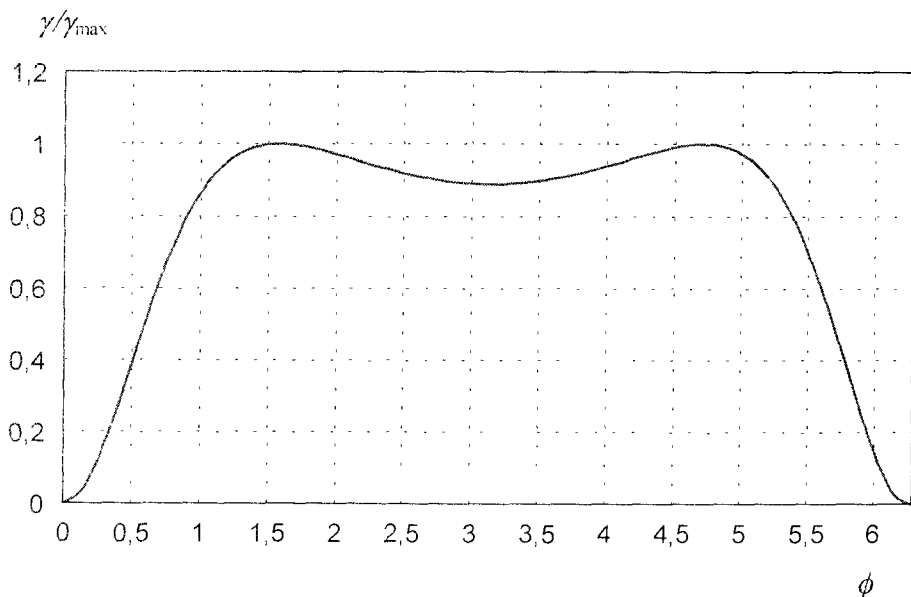
można stwierdzić, że wykładnik potęgowy n będący wskaźnikiem nienewtonowskich własności ośrodka zmienia się od wartości $n=0.96$ dla temperatury $T=300^\circ\text{K}$, do $n=0.58$ dla $T=360^\circ\text{K}$.



Rys.3. Napężenie ścinające i lepkość oleju TOTALCARTEL EP460 w funkcji szybkości ścinania. Temperatura 300°K



Rys.4. Napężenie ścinające i lepkość oleju TOTALCARTEL EP460 w funkcji szybkości ścinania. Temperatura 360°K



Rys. 5. Zmiany szybkości ścinania w funkcji współrzędnej katowej ϕ

Jedyną rozsądną metodą określenia przybliżonych parametrów pracy łożyska jest przyjęcie w obliczeniach średniej wielkości μ dla całego zakresu szybkości ścinania i temperatury pracy łożyska. Niezbędne jest wówczas badanie własności reologicznych oleju w warunkach pracy przy użyciu reometrów.

Takie podejście do problemu pozwoli jednak na optymalny dobór medium smarującego dla konkretnych celów.

4. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawiona w pracy analiza wpływu szybkości ścinania na zmiany lepkości medium smarnego pozwala na wyciągnięcie wniosków, że w przypadku przepływów szczelinowych, jakie mają miejsce w łożyskach ślizgowych rolek nośnych pieców cementowych, prawidłowy dobór olejów powinien opierać się na szczegółowym badaniu ich własności reologicznych w warunkach zbliżonych do parametrów pracy. Niestety, w praktyce często jedynym kryterium doboru staje się katalog producenta zawierający informacje na temat lepkości oleju często określanej w jednostkach umownych. Prowadzi to w konsekwencji do wyborów nietrafnych a co za tym idzie - do szybszego zużycia się, a niekiedy i zniszczenia łożysk w trakcie eksploatacji rolek nośnych.

5. LITERATURA

- [1] Korewa W., Zygmunt K.: Podstawy konstrukcji maszyn, WNT, Warszawa 1975.
- [2] Łocjanskij L.G.: Mechanika żidkosti i gaza, „Nauka”, Moskwa 1987.

- [3] Zahorski S.: Mechanika przepływów cieczy lepkością, PWN, Warszawa-Poznań 1978.
- [4] Kiciński J.: Wpływ zapowietrzenia filmu smarnego oraz jego przestrzennej i czasowej kompresji na charakterystyki statyczne i dynamiczne łożysk ślizgowych, Prace Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, PWN, Warszawa - Poznań 1985.
- [5] Kembłowski Z.: Inżynieria chemiczna, WNT, Warszawa 1973.

THE INFLUENCE OF RHEOLOGIC PROPERTY OF LUBRICANT ON SLIDE BEARING WORK IN ROLLERS OF ROTARY KILN

Summary

The paper pays attention to very important part of rheologic property of lubricant on slide bearing's work. The dependence non-newtonian liquid viscosity of cut velocity should be one of main criterions by oil selecting for flux in crevice with lubricating film effect. This one assures proper roller's work owing to good selecting of slide bearing's capacity.

METODA TERMICZNA PROSTOWANIA PŁASZCZY WALCZAKÓW OBROTOWYCH

Maciej Świtalski, Janusz Zachwieja

Wydział Mechaniczny ATR
Katedra Mechaniki Stosowanej
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Artykuł przedstawia metodę termicznego prostowania płaszczy walczków obrotowych na przykładzie zastosowania jej przy prostowaniu końcówki kalcynatora w Janikowskich Zakładach Sodowych „Janikosoda” S.A. w listopadzie 1996 roku oraz zwraca uwagę na kluczową w tej metodzie procedurę wykrywania źródeł mimośrodowości, umożliwiającą uzyskanie dodatkowych informacji w postaci wartości lokalnych deformacji płaszcza w tego typu obiektach wielkogabarytowych.

Słowa kluczowe: waleczak obrotowy, prostowanie termiczne

1. POJĘCIA I OZNACZENIA

- M_i - *mimośrodość (korbowatość) płaszcza walczaka obrotowego* - wektor wychylenia geometrycznej osi płaszcza walczaka obrotowego od osi jego obrotu, rozpatrywany w danej (i -tej) płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu, *mm*,
- φ_i - *kąt mimośrodości (korbowatości) płaszcza walczaka obrotowego* - numer podziału obwodu, w kierunku którego zwrócony jest wektor mimośrodości płaszcza walczaka obrotowego w danej (i -tej) płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu tego walczaka, *liczba określająca numer podziału obwodu*,
- W_i - *bicie płaszcza walczaka obrotowego* - różnica między największym a najmniejszym wychyleniem płaszcza walczaka obrotowego w danej płaszczyźnie prostopadłej (do osi obrotu) przekroju tego walczaka, mierzona od stałego obranego punktu zewnętrznego, leżącego w rozpatrywanej (i -tej) płaszczyźnie, będąca nałożeniem się wpływu mimośrodości i błędów kształtu płaszcza walczaka obrotowego, *mm*.

2. WSTĘP

Wymiana fragmentu płaszcza walczaka obrotowego wiąże się nierozdzielnie z koniecznością poprawnego wmontowania nowej cargin. Jest to czynność niezwykle odpowiedzialna i mająca swoje odbicie w późniejszej eksploatacji walczaka [1,2,4]. Nieprawidłowy montaż fragmentu płaszcza może być przyczyną bardzo niekorzystnego zjawiska mimośrodości (korbowatości). Zjawisko to, szczególnie niepożądane wsze-

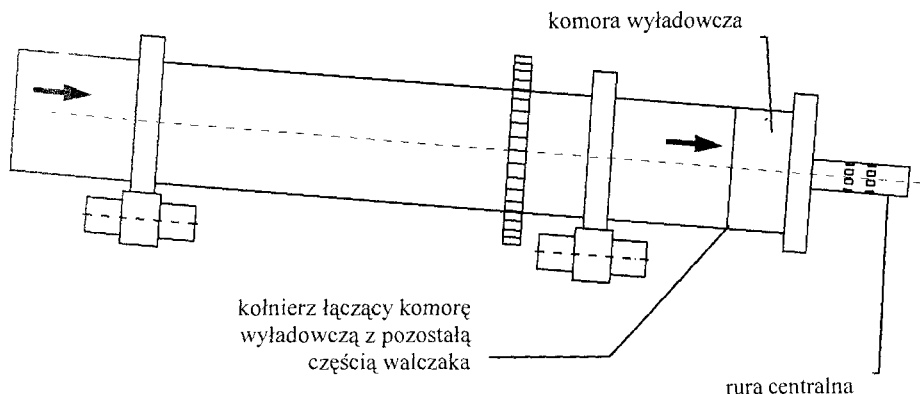
dzie tam, gdzie fragment płaszczu współpracuje z „elementami stałymi” (uszczelnienia na włocie i wylocie, strefa napędu, strefy podporowe), charakteryzuje się wychyleniem geometrycznej osi walczaka obrotowego od osi obrotu w rozpatrywanym przekroju prostopadłym do osi obrotu [3,4].

Elementy płaszczu łączone są ze sobą najczęściej poprzez spawanie. Ten rodzaj połączenia wprowadza naprężenia i odkształcenia termiczne, wskutek czego warunek pokrywania się osi obrotu z osią geometryczną jest trudny do zrealizowania, nawet przy zastosowaniu specjalnych technologii spawania w trakcie obrotu. Sprowadzenie osi geometrycznej do osi obrotu odbywa się w trakcie serii pomiarów i regulacji względnego położenia szepionych wstępnie elementów, którym nieodzownie towarzyszy obrót walczaka. Na bazie doświadczeń autorów, pozyskanych w trakcie przeprowadzanych przez nich kompleksowych obsługa pomiarowych prac remontowych tego typu obiektów, wiadomo, że nawet jeśli połączenie wstępne umożliwi bezpieczne (bez groźby zerwania) obrócenie walczaka, to miejsce łączenia carg charakteryzuje się często zmniejszoną sztywnością oraz nieciągłością sztywności na obwodzie złącza (zwykle są to połączenia śrubowe), co utrudnia pomiary, a więc i rzutuje na ostateczną wartość uzyskanej mimośrodowości [5].

3. CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU

Przed podobnymi problemami stanęli autorzy w trakcie prac pomiarowych w listopadzie 1996 roku przy obsłudze remontu kalcynatora w Janikowskich Zakładach Sodyowych „Janikosoda” S.A., gdzie zdecydowano się wspólnie z firmą Montostal z Janikowa (głównym wykonawcą remontu) na opracowanie i wdrożenie na tym obiekcie metody termicznej prostowania płaszczu walczaka [6].

Płaszcz kalcynatora wykonany jest w postaci walczaka o średnicy wewnętrznej 3000 mm. Do jego „dolnej” końcówki przyspawany jest kołnierz połączeniowy umożliwiający zainstalowanie, przy pomocy śrub, komory wyladowczej. Do tejże komory przykręcana jest rura centralna, przez otwory której do armatury wewnętrznej kalcynatora podawana jest para wodna. Dokumentacja techniczna oraz rozwiązanie zawieszenia głowicy obejmującej rurę centralną determinują bardzo małe wartości bicia na końcówce rury centralnej. Nie powinno ono przekraczać 4 mm. Uzyskanie takiej dokładności stanowiło poważny problem. Przyczyną problemu był wymagany sposób zamocowania kołnierza do końcówki walczaka. Uniemożliwiał on przyspawanie kołnierza przy zainstalowanej komorze wyladowczej wraz z rurą centralną. W trakcie badań wstępnych przebiegu osi geometrycznej na odcinku od „niższego” pierścienia biegowego do „dolnej” końcówki płaszczu wykryto źródło mimośrodowości (miejsce przegięcia). Istnienie tego źródła oraz brak możliwości przyspawania kołnierza przy zamocowanej wstępnie komorze wyladowczej powodowały, że niemożliwe było „naprowadzenie” osi geometrycznej rury centralnej do osi obrotu poprzez odpowiednie (w tym przypadku świadomie zwichrowane) zamocowanie kołnierza połączeniowego (rys.1).



Rys.1. Widok ogólny kalcyatora

4. PRZYJĘTA METODYKA I PRZEBIEG PRAC POMIAROWYCH

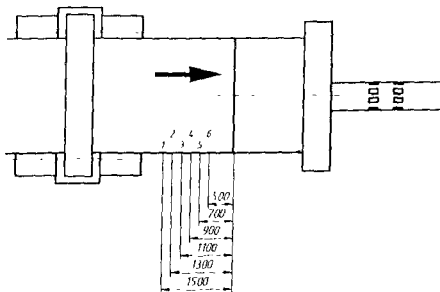
Zdecydowano się więc na zainstalowanie kołnierza współosiowo z końcówką „dolną” płaszcza i regulację bicia mierzonego na końcówce rury centralnej poprzez niwelację źródła mimośrodowości na odcinku od „niższego” pierścienia biegowego do „dolnej” końcówki walczaka metodą termiczną.

W tym celu przeprowadzono badania przebiegu osi geometrycznej zgodnie z procedurą opracowaną przez autorów publikacji i stosowaną przez nich z powodzeniem od 1994 roku zarówno przy pracach remontowych oraz w trakcie przeglądów okresowych walczków obrotowych.

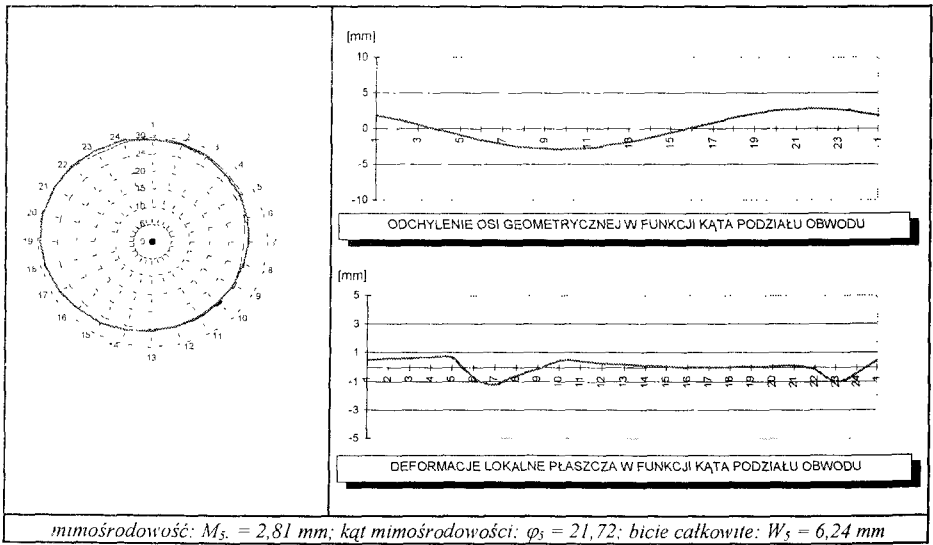
Zgodnie z tą procedurą, w okolicach potencjalnego źródła mimośrodowości, wyznaczono sześć płaszczyzn pomiarowych (rys.2), dla których na bazie pozyskanych

wyników obliczono wartości mimośrodowości, ich kąty lokalizacji oraz bicia maksymalne zarysów przekrojów, jak również deformacje płaszcza walczaka w tych przekrojach. Wyniki obliczeń w poszczególnych płaszczyznach przedstawiono wybiórczo w postaci graficznej na rysunkach 3 i 4. Wyniki te, po ich uporządkowaniu (tab.1), pozwoliły uzyskać przestrzenny przebieg osi geometrycznej (rys.5).

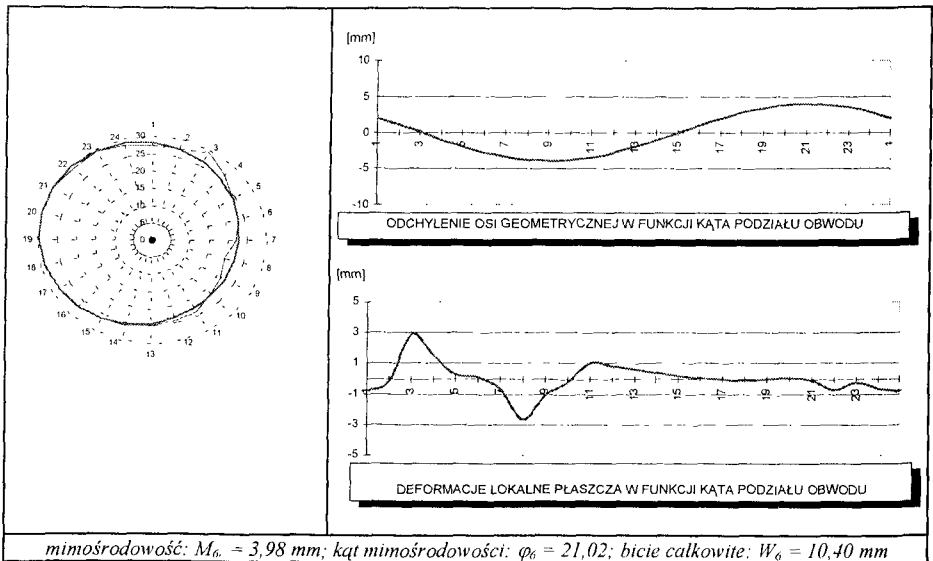
Dokonano również pomiaru mimośrodowości na końcówce rury centralnej, która wyniosła 6,46 mm (rys. 6).



Rys.2. Lokalizacja przekrojów pomiarowych



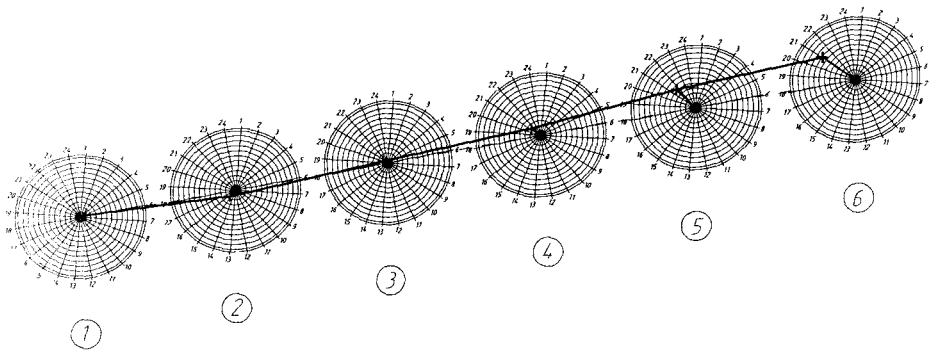
Rys.3. Graficzna prezentacja parametrów geometrii przekroju nr 5



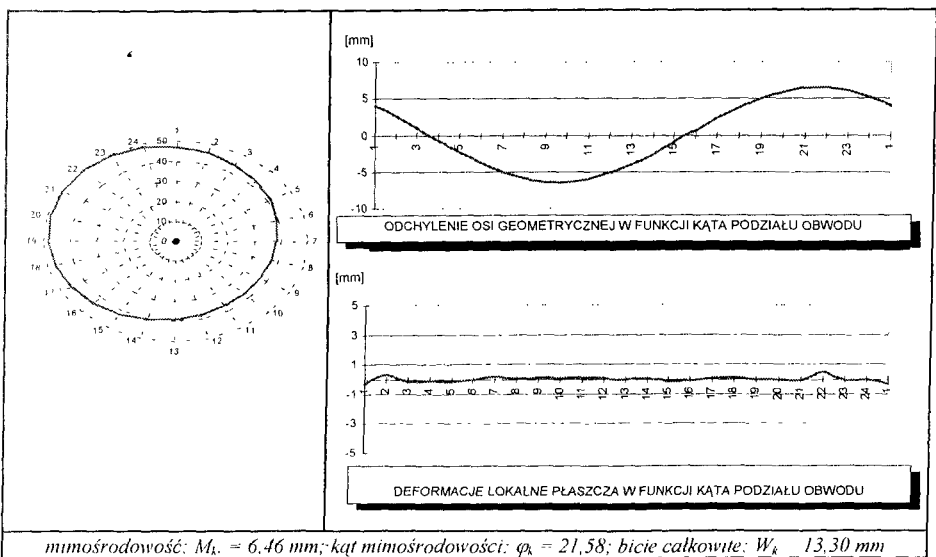
Rys.4. Graficzna prezentacja parametrów geometrii przekroju nr 6

Tablica 1. Uporządkowane wyniki pomiarów mimośrodkowości w przekrojach od 1 do 6

Nr przekroju		1	2	3	4	5	6
Mimośrodkowość	M_i	0,54	0,72	0,53	1,20	2,81	3,98
Kąt mimośrodkowości	φ	5,55	15,52	20,00	21,30	21,72	21,02



Rys.5. Przestrzenny przebieg osi geometrycznej na długości płaszcza kalcynatora równej 1m



Rys.6. Graficzna prezentacja parametrów geometrii przekroju na końcówce rury centralnej

5. WYZNACZENIE LOKALIZACJI I SPOSOBU WPROWADZENIA KLINÓW TERMICZNYCH

Umiejętność wyznaczenia przebiegu mimośrodkowości i jej kąta na długości walczaka oraz właściwa kontrola nad nagrzewaniem czy też chłodzeniem obrabianego cieplnie elementu to podstawa do wykonania operacji prostowania termicznego płaszcza walczaka. Z rysunku 5 widać wyraźnie lokalizację źródła mimośrodkowości, która to mieści się między drugim a czwartym przekrojem, czyli na długości około 400 mm. Następstwem istnienia miejsca przegięcia są rosnące wartości mimośrodkowości w przekrojach piątym i szóstym oraz na końcówce rury centralnej. Faktem ułatwiającym rozważania jest stabilność kąta mimośrodkowości w tych przekrojach, która wyraźnie sugeruje jednopłaszczyznowość zjawiska przegięcia kalcynatora. Domniemanym źródłem tego przegięcia są naprężenia spawalnicze powstałe w trakcie łączenia elementów

płaszcza. Takowe miejsce łączenia w badanym przypadku mieściło się między przekrojem nr 2 a przekrojem nr 3 w odległości 60 mm od przekroju nr 2.

Korelacja znajomości wartości mimośrodowości i jej przebiegu na długości oraz faktu występowania połączenia spawanego w miejscu przegięcia dała podstawę do wyznaczenia miejsc wprowadzenia klinów termicznych.

Kliny termiczne, czyli miejsca podgrzewania i następującego po nim chłodzenia, mają za zadanie wprowadzenie kontrolowanych naprężeń wewnętrznych. Naprężenia wewnętrzne można podzielić na naprężenia cieplne i naprężenia strukturalne [7].

Naprężenia natury cieplnej powstają w wyniku nierównomiernego chłodzenia czy też nagrzewania przedmiotów ze stali w zakresie poniżej linii A_1 (727°C) na wykresie żelazo-cementyt i związane są z rozszerzalnością cieplną przy nagrzewaniu. Zjawisko to pozornie jest zjawiskiem odwracalnym (przedmiot nagrany i następnie chłodzony powraca do swych pierwotnych wymiarów). Gdyby więc nagrzewanie czy też chłodzenie odbywało się równomiernie w całej masie przedmiotu, naprężenia nie powstałyby. Stosując jedynie miejscowe nagrzewanie i chłodzenie wprowadza się świadomie naprężenia, które są źródłem odkształceń tym większych, im większe są gradienty temperatur w masie przedmiotu. Stosując ten sposób zadawania naprężeń trzeba być świadomym, że w przypadku nagrzewania naprężenia zanikają po osiągnięciu dostatecznie wysokiej temperatury, ponieważ granica plastyczności ze wzrostem temperatury maleje i materiał odkształcając się ulega odprężeniu. Pozostają jednak w tym przypadku trwałe odkształcenia, znaczne zwłaszcza, gdy nagrzewanie nie było równomierne. Natomiast przy chłodzeniu, gdy granica plastyczności wzrasta, mogą pozostać w materiale znaczne naprężenia nawet po zupełnym wyrównaniu temperatury.

Naprężenia strukturalne powstają w wyniku zmian objętościowych natury strukturalnej przy przejściu przez zakres temperatur krytycznych. Poszczególne składniki strukturalne stali mają różną objętość właściwą, co można przedstawić w postaci następującego szeregu składników strukturalnych o wzrastającej objętości właściwej: austenit, perlit, sorbit, bainit, martenzyt. Zmiany objętościowe natury strukturalnej ze względu na swoją wartość ($0,5 \div 1,5\%$) i szybkość, z jaką zachodzą, powodują ogromne naprężenia, znacznie przewyższające naprężenia pochodzące od zjawisk rozszerzalności cieplnej i są dlatego głównym powodem odkształceń, ale i pęknięć.

Możliwość wystąpienia pęknięć oraz dążność do zachowania tej samej struktury po prostowaniu waleczaka w stosunku do struktury materiału przed operacją jednoznacznie wskazały w tym przypadku drogę zadania kontrolowanych odkształceń. Postanowiono ograniczyć się do wprowadzenia odkształceń natury czysto cieplnej.

Ponadto warunki pracy kalcynatora (temperatura) stanowią gwarancję, że dokonana operacja będzie miała długoterminowy skutek, gdyż wygrzewanie poniżej temperatury 400°C (w takim obszarze temperatur pracuje płaszcza kalcynatora) ma nieistotny wpływ na przebieg procesu wyzarcia odpężającego, który mógłby częściowo zminimalizować uzyskany wynik wyprostowania płaszcza waleczaka.

Zważywszy na powyższe, ustawiono kalcynator w pozycji zapewniającej maksymalne wychylenie wektora mimośrodowości ku górze na końcówce rury centralnej ($\varphi_k = 21,5$) i następnie przy pomocy palnika acetylenowo-tlenowego o specjalnej konstrukcji umożliwiającej równomierne nagrzewanie pasa materiału o szerokości 200 mm oraz zapewniającej uzyskanie odpowiedniej odległości stożka płomienia od powierzchni nagrzewanej, zaczęto wprowadzać klin termiczny. Przyjęty klin miał w rozwinięciu kształt prostokąta o długości równej połowie obwodu kalcynatora i szerokości 400 mm (szerokość strefy od przekroju nr 2 do 4) i zlokalizowany był poniżej osi geometrycznej

walczaka. Przy nagrzewaniu starano się zachować rozkład temperatur na nagrzewanej powierzchni zgodnie z poniższymi wzorami:

$$T_{\varphi} = (\varphi - 3,5) \cdot 80 + 20, \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ dla } \varphi \text{ zmieniaj'cego się od } 3,5 \text{ do } 9,5,$$

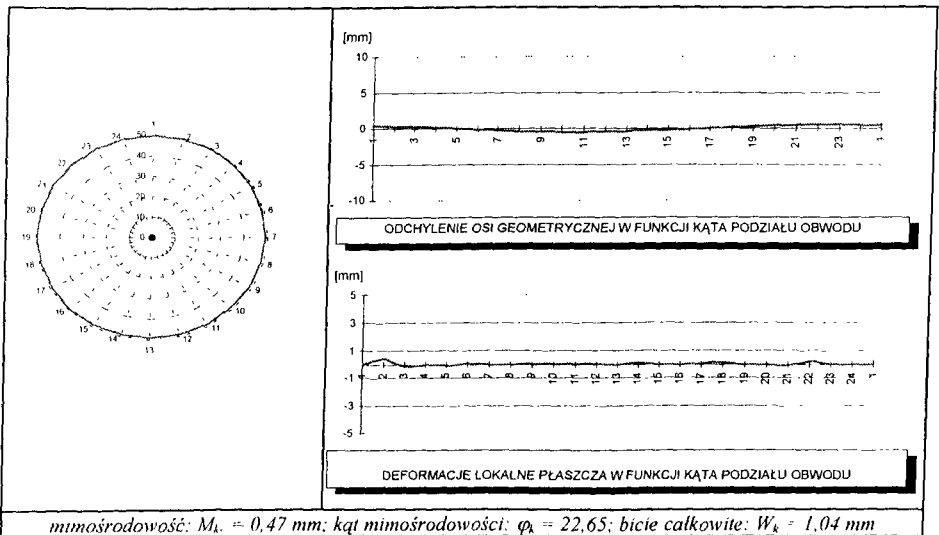
$$T_{\varphi} = (15,5 - \varphi) \cdot 80 + 20, \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ dla } \varphi \text{ zmieniaj'cego się od } 9,5 \text{ do } 15,5.$$

Po nagraniu powierzchni szybko ją schłodzono poprzez polewanie strumieniem wody, jednocześnie kontrolując „opadanie” końcówki rury centralnej kalcynatora.

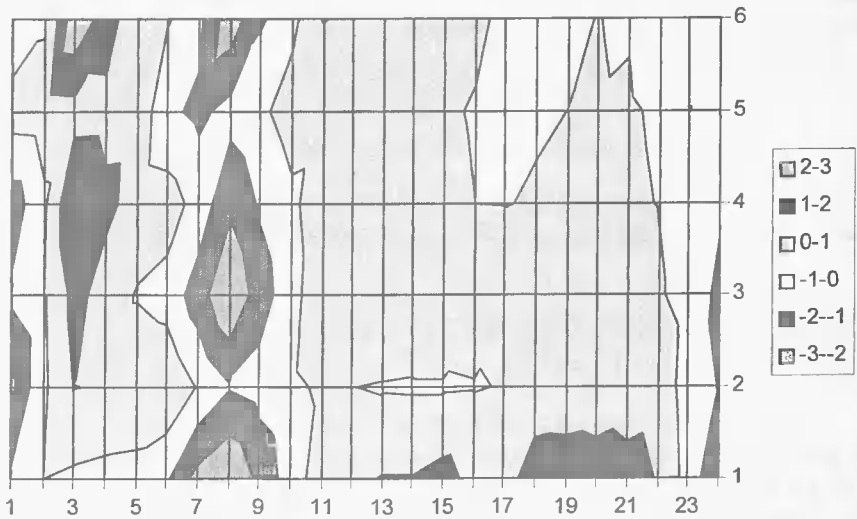
6. EFEKTY ZASTOSOWANIA METODY PROSTOWANIA TERMICZNEGO - WNIOSKI

W efekcie zastosowania metody uzyskano mimośrodowość o wartości 0,47 mm przy biciu maksymalnym 1,04 mm (rys.7), co jest nadzwyczajnym wynikiem, zważywszy że jak podaje obsługa urządzenia nie udało się w całej historii remontów kalcynatorów w Janikowskich Zakładach Sodowych zejść poniżej 4 mm bicia na końcówce rury centralnej.

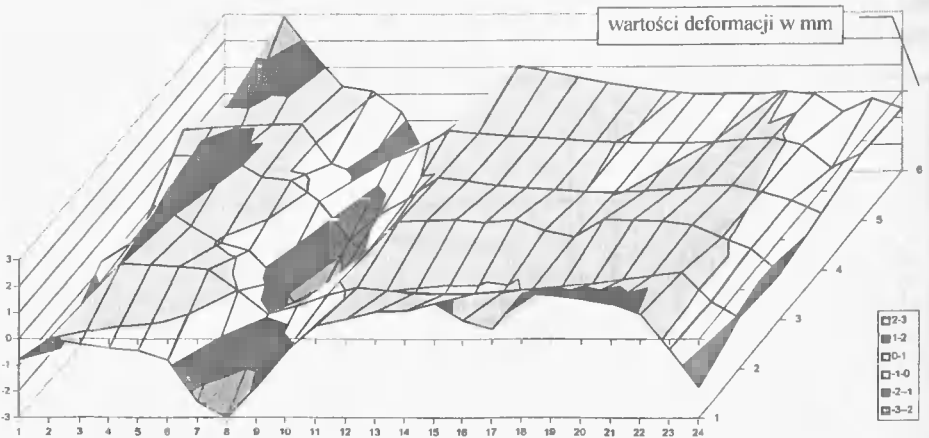
Pomiary na długości walczaka w sześciu równomiernie oddalonych od siebie przekrojach (co 200 mm), oprócz możliwości wskazania miejsca przegięcia, dały jednocześnie pogląd na kształt deformacji jego płaszczy na tym odcinku (rys.8 i 9), co może być wykładnią przy ocenie stopnia deformacji oraz możliwości dalszego użytkowania tego fragmentu walczaka.



Rys.7. Graficzna prezentacja parametrów geometrii przekroju na końcówce rury centralnej po prostowaniu



Rys.8. Mapa deformacji odcinka płaszcza walczaka w funkcji kąta podziału obwodu (sześć przekrojów - 1 m)



Rys.9. Mapa przestrzenna deformacji odcinka płaszcza walczaka w funkcji kąta podziału obwodu (sześć przekrojów - 1 m)

Uzyskane efekty wdrożenia metody pozwalają na stwierdzenie niepodważalnych możliwości zastosowania jej wszędzie tam, gdzie wymagane są niezwykle małe wartości mimośrodowości, których ze względu na naprężenia spawalnicze lub ograniczenia konstrukcyjne nie można w sposób tradycyjny osiągnąć. Ponadto pojawiają się dodatkowe możliwości korygowania położenia osi geometrycznej bez konieczności przeprowadzania kosztownego remontu.

LITERATURA

- [1] Kurdowski W.: Poradnik technologa przemysłu cementowego. Arkady, Warszawa 1981.
- [2] Ahrends I., Cieśliński W.: Technologia cementu. BA, Warszawa 1956.
- [3] Mechaniczny przegląd pieca - typ E - sprawozdanie z przeglądu pieca do wypału klinkieru w Ożarowie przeprowadzonego przez F.L.Smitdh w 1992 roku (praca nie publikowana).
- [4] Mechaniczny przegląd pieca - sprawozdanie z przeglądu pieca wapienniczego w „Inernational Paper” - Kwidzyn przeprowadzonego przez F.L.Smitdh w 1995 roku (praca nie publikowana).
- [5] Zachwieja J., Świtalski M.: Sprawozdanie z przebiegu prac obsługi pomiarowej remontu pieca do wypału klinkieru nr 3 w Kombinacie Cementowo-Wapienniczym „Kujawy” - kwiecień 1995 (praca nie publikowana).
- [6] Zachwieja J., Świtalski M.: Sprawozdanie z przebiegu prac kompleksowej obsługi pomiarowej remontu kalcynatora w Janikowskich Zakładach Sodowych „Janikosoda” S.A. - listopad 1996 (praca nie publikowana).
- [7] Rudnik S.: Metaloznawstwo. PWN, Warszawa 1994.

THE THERMIC METHOD OF ROTARY DRUM STRAIGHTENNING

Summary

This article presents thermic method of rotary drum straightenning. Such method was applied in Janikowo Soda Works „Janikosoda” S.A. by end of calciner straightenning in November 1996. Moreover this publication pays attention to procedure of course eccentricity detection which one is very important in this method and which one makes possible getting information about local deformation of shell in large-scale devices like this type.

ANALIZA SYMULACYJNA PROCESU EKSPLOATACJI W SYSTEMIE KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ

Maciej Woropay, Bogdan Landowski

Wydział Mechaniczny ATR
Katedra Eksploatacji Maszyn
ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W opracowaniu przedstawiono model procesu eksploatacji realizowany w systemie transportu miejskiego oraz metodę budowy programu symulacyjnego. Dokonano weryfikacji programu symulacyjnego.

Słowa kluczowe: system eksploatacji, proces eksploatacji, model procesu eksploatacji, system eksploatacji, system transportowy, proces stochastyczny

1. WPROWADZENIE

Wykorzystanie badań operacyjnych do analizy cyklu zdarzeń zachodzących w procesie eksploatacji maszyn może stanowić właściwą podstawę do podejmowania racjonalnych decyzji sterujących systemem realizującym ten proces. Optymalizacja działań dotyczy utrzymania maszyn w stanie zdatności zadaniowej na wymaganym poziomie gotowości technicznej.

Podstawą analizy jest model procesu realizowanego w systemie transportowym opisany w kategorii stanów i możliwych przejść między tymi stanami. Stany procesu charakteryzowane są rozkładami czasów przebywania oraz ponoszonymi kosztami, zależnymi od rodzaju stanu.

Znajomość rozkładów zmian stanów upoważnia do zastosowania łańcuchów semi-Markowa.

2. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań jest rzeczywisty system transportu miejskiego tj. Zakład Komunikacji Autobusowej (ZKA) oraz realizowany w tym systemie proces eksploatacji autobusów.

W Zakładach Komunikacji Autobusowej eksploatowane są autobusy następujących typów:

- Ikarus 260;
- Ikarus 280;
- MAN;
- Jelcz.

Podstawowym celem działania identyfikowanego systemu jest realizacja efektywnych (w sensie kryterium ekonomicznego) i bezpiecznych przewozów pasażerskich, w wyznaczonym przez system nadrzędny zakresie ilościowym i terytorialnym (określonym przyjętym rozkładem jazdy), eksploatowanymi w systemie obiektami technicznymi (w szczególności autobusami).

W Zakładach Komunikacji Autobusowej realizowane są następujące zadania:

- planowanie działań i kierowanie ich realizacją;
- sterowanie użytkowaniem pojazdów (i innych obiektów technicznych zabezpieczających te działania);
- utrzymywanie pojazdów w ruchu;
- logistyczne zabezpieczanie działań systemu;
- przechowywanie pojazdów.

Jest to system o strukturze hierarchicznej typu <C-OT>. Integralną częścią ZKA jest stacja obsługi pojazdów (rozumiana jako podsystem antropotechniczny - ludzie + obiekty techniczne), której działaniem kieruje kierownik stacji obsługi. W stacji obsługi pojazdów realizowane są czynności profilaktyczne dotyczące pojazdów (obsługa codzienna, diagnozowanie, regulacje) oraz naprawy (bieżące, awarie, inne).

Czynności profilaktyczne i naprawy pojazdów wykonywane są na stanowiskach naprawczych w stacji obsługi albo przez jednostki pogotowia technicznego poza terenem ZKA.

Z przeprowadzonej identyfikacji działania ZKA i analizy wartości obliczonych wskaźników efektywności 300 autobusów typu Ikarus 280 w okresie 280 dni wynika, że proces eksploatacji pojazdów realizowany jest w systemie według mało efektywnej strategii, z punktu widzenia możliwości wykorzystania potencjału użytkowego.

W badanym systemie eksploatacji wyróżniono cztery podsystemy (rys.1):

- procesowy;
- sterowania;
- zapewnienia zdatności;
- diagnostyczny.

Cel działania systemu eksploatacji bezpośrednio realizowany jest przez podsystem procesowy, zawierający obiekty techniczne wraz z ich operatorami.

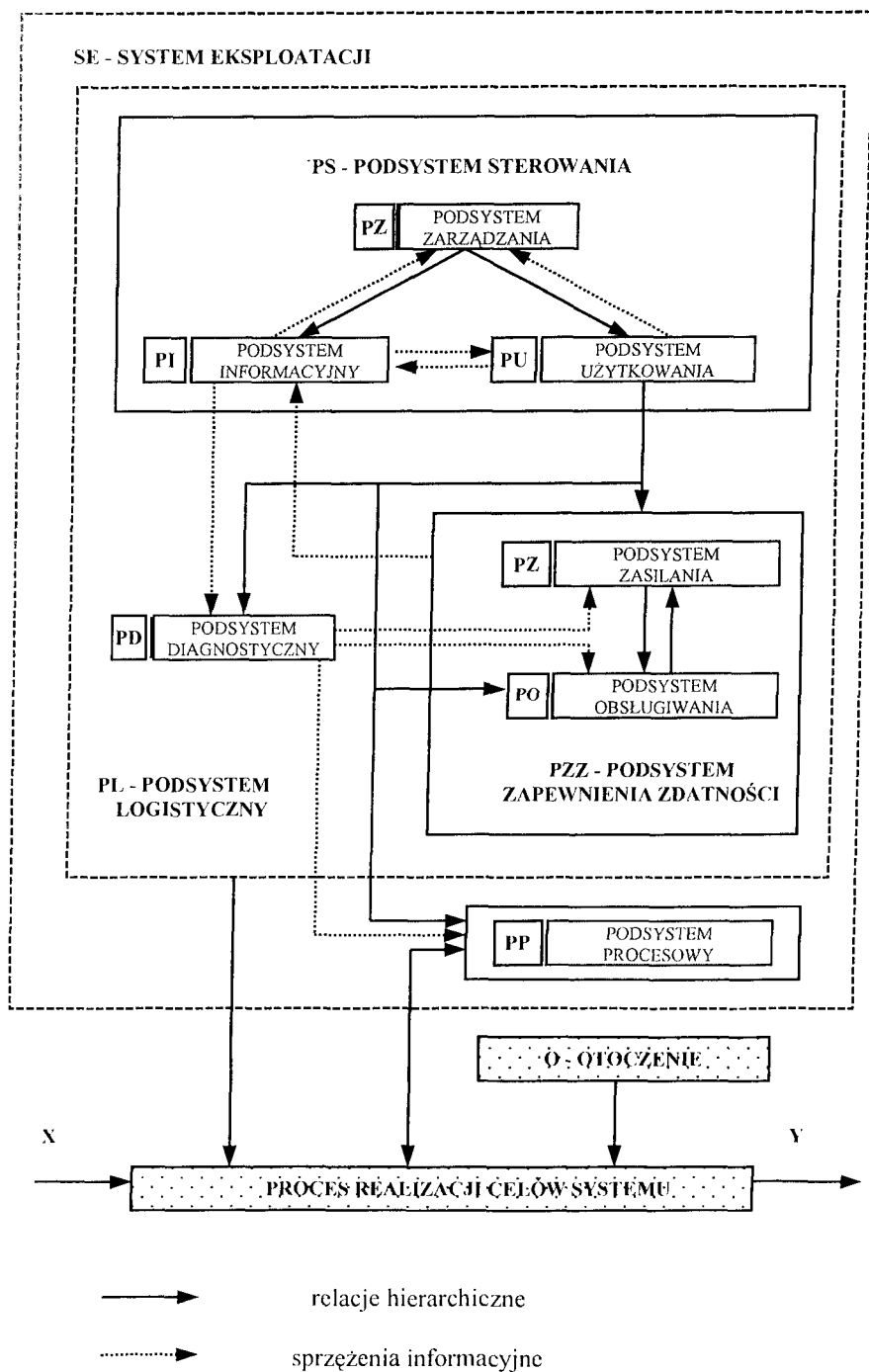
Podsystem sterowania eksploatacją spełnia funkcję kierującą i nadzorującą działanie systemu eksploatacji. Obsługiwanie, a w szczególności odnowa, realizowane są przez podsystem zapewnienia zdatności.

Rola współdziałającego z podsystemem zapewnienia zdatności, podsystemu diagnostycznego polega na badaniu sygnałów i symptomów diagnostycznych celem wyznaczenia przeszłych, aktualnych lub przyszłych stanów eksploatowanych obiektów technicznych oraz na ocenie działania ich operatorów i identyfikacji stanów otoczenia.

Ponieważ system eksploatacji jest systemem złożonym i wielozadaniowym (realizującym wiele zadań), w zależności od stanu jego podsystemów, może on realizować wszystkie lub niektóre wybrane zadania.

Uwzględniono również otoczenie systemu, którego oddziaływanie ułatwia lub uniemożliwia realizację zadań przez system.

Z tego powodu otoczenie badanego systemu eksploatacji potraktowano jako jeden z podsystemów współdziałających z badanym systemem i włączono go do modelu opisującego istotne (z punktu widzenia efektywności) stany procesu eksploatacji obiektów technicznych.



Rys. 1. Hierarchiczna struktura systemu eksploatacji [8]

3. OPIS MODELU

W wyniku identyfikacji systemu miejskiej komunikacji autobusowej i realizowanego w nim wielostanowego procesu eksploatacji obiektów technicznych, w oparciu o kryterium istotności stanów (kryterium zysków), wyróżniono 11 istotnych stanów tego procesu. Analizowane w symulacyjnym modelu procesu eksploatacji stany tego procesu odpowiadają stanom eksploatacyjnym obiektów technicznych.

Każdy z eksploatowanych obiektów technicznych może, w danej chwili czasu, znajdować się tylko w jednym z opisanych poniżej stanów modelu:

Uwaga: W celu uproszczenia opisu przyjmuje się, że używane określenie: "zdatność (niezdadność) zadaniowa obiektu technicznego" odnosi się zarówno do obiektu technicznego, jak i jego operatora, tzn. do układu $\langle C - OT \rangle$.

S₁ - Stan intensywnego użytkowania obiektu technicznego

Stan intensywnego użytkowania obiektu technicznego jest to stan, w którym $\langle OT \rangle$ wraz z operatorem realizują przydzielone im zadanie przewozowe.

W badanym systemie transportu miejskiego zdefiniowanie dziennego zadania przewozowego dla danego obiektu technicznego i operatora polega na przydzieleniu numeru trasy oraz numerów kursów. Zakres terytorialny zadania przewozowego jest określony numerem trasy, natomiast czasowy numerami kursów zgodnie z obowiązującym rozkładem jazdy.

Jako realizację zadania przewozowego w szczególności rozumie się:

- przejazdu z (do) miejsca postoju do (od) miejsca początkowego (końcowego) danej trasy i kursu;
- przejazdu przydzielonej trasy;
- przerwy pomiędzy kursami wynikające z obowiązującego rozkładu jazdy.

S₂₁ - stan oczekiwania obiektu technicznego na jednostkę pogotowia technicznego

Stan oczekiwania obiektu technicznego na jednostkę pogotowia technicznego jest to stan, w którym niezdatny zadaniowo obiekt techniczny znajdujący się w otoczeniu SE (w sensie terytorialnym), oczekuje na przybycie jednostki PT lub wraz z operatorem przemieszcza się do miejsca postoju jednostki PT.

S₂₂ - stan odnowy obiektu technicznego realizowanej w otoczeniu systemu eksploatacji

Stan odnowy obiektu technicznego realizowanej w otoczeniu systemu eksploatacji jest to stan, w którym niezdatny zadaniowo obiekt techniczny znajdujący się w otoczeniu systemu eksploatacji podlega działaniom zmierzającym do przywrócenia mu stanu zdadności zadaniowej.

W badanym systemie transportu miejskiego jako działania zmierzające do przywrócenia stanu zdadności zadaniowej obiektowi technicznemu znajdującemu się w otoczeniu systemu eksploatacji w szczególności rozumie się:

- wykonywanie odnowy przez jednostki PT;

- holowanie pojazdu przez jednostki PT do stacji diagnostycznej lub stacji obsługi (należących do SE);
- zjazd awaryjny pojazdu do stacji diagnostycznej lub stacji obsługi.

S₃₁ - stan oczekiwania obiektu technicznego na odnowę realizowaną w systemie eksploatacji

Stan oczekiwania obiektu technicznego na odnowę realizowaną w systemie eksploatacji jest to stan, w którym niezdatny zadaniowo obiekt techniczny znajdujący się w systemie eksploatacji (w sensie terytorialnym) po zgłoszeniu do odnowy oczekuje na rozpoczęcie realizacji procesu odnowy.

S₃₂ - stan odnowy obiektu technicznego realizowanej w systemie eksploatacji

Stan odnowy obiektu technicznego realizowanej w systemie eksploatacji jest to stan, w którym obiekt techniczny znajdujący się w systemie eksploatacji podlega odnowie.

S₄₁ - stan oczekiwania obiektu technicznego na diagnozowanie

Stan oczekiwania obiektu technicznego na diagnozowanie jest to stan, w którym obiekt techniczny znajdujący się w systemie eksploatacji po zgłoszeniu do diagnozowania oczekuje na rozpoczęcie realizacji procesu diagnozowania.

S₄₂ - stan diagnozowania obiektu technicznego

Stan diagnozowania obiektu technicznego jest to stan, w którym znajdujący się w systemie eksploatacji obiekt techniczny podlega procesowi diagnozy.

Jako diagnozowanie obiektu technicznego znajdującego się w systemie eksploatacji w szczególności rozumie się :

- tzw. diagnozowanie przednaprawcze (gdy obiekt znajduje się w stanie niezdatności zadaniowej);
- tzw. diagnozowanie ponaprawcze (jako kontrola poprawności realizacji procesu odnowy);
- tzw. diagnozowanie wyprzedzające (zmierające do zapobieżenia występowania uszkodzeń w trakcie realizacji zadania przewozowego przez obiekt techniczny wynikające z realizowanej strategii eksploatacji).

S₄₃ - stan obsługi codziennej obiektu technicznego

Stan obsługi codziennej obiektu technicznego jest to stan, w którym realizowane są działania związane z tzw. obsługą codzienną obiektu technicznego wynikającą z stosowanej strategii eksploatacji.

W badanym systemie transportu miejskiego obsługa codzienna obiektu technicznego wykonywana jest w systemie eksploatacji (w sensie terytorialnym) bezpośrednio po zakończeniu realizacji dziennego zadania przewozowego.

S₅ - stan oczekiwania obiektu technicznego na podjęcie realizacji zadania przewozowego

Stan oczekiwania obiektu technicznego na podjęcie realizacji zadania przewozowego jest to stan, w którym bezpośrednio po przywróceniu obiektowi technicznemu stanu zdad-

ności zadaniowej lub po zmianie stanu otoczenia systemu eksploatacji na stan zdatności (przy jednoczesnym stanie zdatności zadaniowej obiektu technicznego) obiekt techniczny nie wykonuje zaplanowanego zadania przewozowego ze względu na sposób organizacji zadań przewozowych.

W badanym systemie transportu miejskiego sposób organizacji zadań przewozowych jest określony istniejącym rozkładem jazdy.

S₆ - stan oczekiwania obiektu technicznego ze względu na niezdatność otoczenia

Stan oczekiwania obiektu technicznego ze względu na niezdatność otoczenia jest to stan, w którym zdalny zadaniowo obiekt techniczny nie realizuje zaplanowanego zadania przewozowego w wyniku zajścia w otoczeniu SE zdarzenia uniemożliwiającego realizację tego zadania (niezdatność otoczenia systemu eksploatacji).

S₇ - stan postoju organizacyjnego obiektu technicznego

Stan postoju organizacyjnego obiektu technicznego jest to stan, w którym obiekt techniczny nie znajduje się, w żadnym z wcześniej wyróżnionych stanów (dla konkretnego systemu transportu miejskiego stan ten wynika z: charakteru podjętych zadań przewozowych, organizacji podsystemu utrzymania ruchu, realizowanej strategii eksploatacji itp).

W badanym systemie transportu miejskiego jako czas przebywania w stanie postoju organizacyjnego obiektu technicznego w szczególności rozumie się:

- czas parkowania zdatnego pojazdu wynikający ze specyfiki zadań przewozowych (przyjętego rozkładu jazdy);
- czas oczekiwania niezdatnego pojazdu (na terenie zajezdni) na odnowę ze względu na brak części wymiennych.

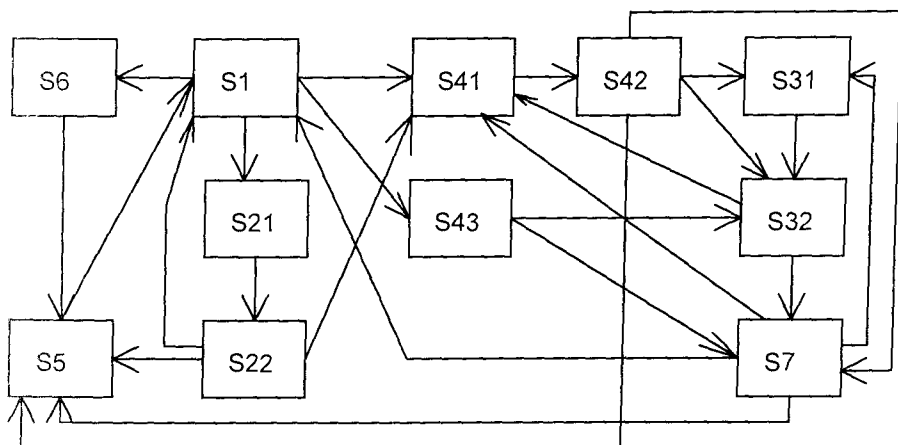
Każdemu ze stanów przyporządkowany jest rozkład czasu przebywania w tym stanie charakteryzowany poprzez wartość średnią oraz odchylenie standardowe.

Jako podstawowy typ rozkładów czasów przebywania w wyróżnionych stanach przyjęto rozkład gamma z odpowiednio dobranymi parametrami wyznaczonymi na podstawie wyników badań eksploatacyjnych.

Czas przebywania obiektu w każdym ze stanów modelu jest zatem generowany zgodnie z rozkładem gamma o konkretnej wartości średniej i odchyleniu standardowym, charakterystycznym dla danego stanu.

Wyniki badań eksploatacyjnych dotyczą 7 autobusów obserwowanych w czasie siedmiu miesięcy 1996 roku, oraz zbioru 21 autobusów w czasie około jednego roku (luty 1995 - marzec 1996). Przyjęcie w modelu generatora typu gamma jest wynikiem analizy danych obserwacyjnych dla wyżej wymienionych zbiorów autobusów w podanych przedziałach czasowych.

Oprócz charakterystyk stanów w procesie identyfikacji systemu eksploatacji wyznaczono możliwe przejścia między stanami, co przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Graf skierowany stanów procesu

Z każdym łukiem grafu łączącym dwa stany związana jest wartość prawdopodobieństwa przejścia procesu ze stanu $i = 1, 2, \dots, 11$ do stanu $j = 1, 2, \dots, 11$ w losowej chwili czasu t . Oszacowanie prawdopodobieństw przejść między stanami procesu w postaci macierzowej przedstawiono na rys.3.

	S ₁	S ₂₁	S ₂₂	S ₃₁	S ₃₂	S ₄₁	S ₄₂	S ₄₃	S ₅	S ₆	S ₇
S ₁		0,75				0,24				0,01	
S ₂₁			1								
S ₂₂	0,7					0,13			0,17		
S ₃₁					1						
S ₃₂						0,95					0,05
S ₄₁							1				
S ₄₂				0,10	0,45				0,14		0,31
S ₄₃					0,2						0,8
S ₅	1										
S ₆									1		
S ₇	0,9			0,001		0,001			0,098		

Rys.3. Macierz prawdopodobieństw zmian stanów

Jak widać na rysunku w niektórych wierszach macierzy znajdują się jedynki, co oznacza, że przejście ze stanu określonego w pierwszej kolumnie macierzy do stanu określonego w pierwszym wierszu macierzy jest zdarzeniem pewnym. Na rysunku 2 odpowiadają im łuki skierowane łączące stany. $S_{21} \rightarrow S_{22}$; $S_{31} \rightarrow S_{32}$; $S_{41} \rightarrow S_{42}$; $S_5 \rightarrow S_1$; $S_6 \rightarrow S_5$.

Zauważmy, że kolumna S_{43} macierzy nie zawiera żadnej liczby, ponieważ osiągnięcie stanu S_{43} jest zdarzeniem pewnym warunkowym. Stan ten osiągnięty jest tylko wówczas, gdy obiekt badań zakończył pracę (S_1) w danym dniu i nie ulegając uszkodzeniu zjechał na plac postojowy.

4. OPIS METODY SYMULACJI

Program symulacji procesu został opracowany na podstawie następujących założeń wstępnych. Pojedynczy obiekt badań (autobus) scharakteryzowany jest poprzez wymienione niżej właściwości:

- stan : liczba naturalna (indeks stanu) przypisana każdemu badanemu obiektowi;
- czas : zmienna rzeczywista, w której przechowywany jest wygenerowany czas w każdym ze stanów z wyjątkiem stanu S_1 ;
- czas jazdy : zmienna rzeczywista, w której przechowywany jest wygenerowany czas jazdy (w stanie S_1);
- t_a : lokalny czas obiektu badań narastający nieprzerwanie od początku symulacji do końca przebiegu symulacji.

Przyjęto ponadto, że symulacja odbywać się będzie do chwili osiągnięcia przez zmienną t_a wartości oznaczającej koniec przebiegu. Ilość obiektów, dla których realizowany jest przebieg symulacyjny określono na 100 jednostek, a czas na 100 dni. Wyznaczone parametry charakteryzujące czasy przebywania w poszczególnych stanach przedstawiono w tabelcy 1.

Tabelca 1. Parametry czasów przebywania w stanach

Stan	Średni czas przebywania, w <i>i</i> -tym stanie	Odechylenie standardowe
S_1 (Stare)	2,5 dni	0,7 dni
S_1 (Nowe)	3,3 dni	0,7 dni
S_{21}	20 minut	10 minut
S_{22}	53 minuty	35 minut
S_{31}	30 minut	10 minut
S_{32}	77 minut	50 minut
S_{41}	10 minut	3 minuty
S_{42}	15 minut	5 minut
S_{43}	15 minut	5 minut
S_5	60 minut	20 minut
S_6	50 minut	30 minut
S_7	60 minut	20 minut

Obiekt badań znajduje się w chwili rozpoczęcia symulacji w stanie S_1 . W tym stanie generowany jest dla niego czas jazdy zgodnie z wyznaczonymi parametrami i typem rozkładu. Następnie generowana jest liczba z rozkładu równomiernego z odcinka $[0, 1]$, aby na tej podstawie oraz na podstawie wartości prawdopodobieństw przejść zawartych

w pierwszym wierszu macierzy przejść między stanami wyznaczyć następny stan. Przejście do tego stanu następuje po upływie wygenerowanego czasu jazdy.

Cykl ten powtarzany jest dla każdego stanu, w którym obiekt znajduje się po zmianie stanu. Każdy wiersz macierzy przejść między stanami wyznacza na odcinku $[0,1]$ podprzedziały w następujący sposób:

niech wiersz zawiera liczby x_1, x_2, \dots, x_k , takie, że dla każdego k , $x_k < 1$, oraz $\sum x_k = 1$.

Wtedy podprzedziały wyznaczone są następująco:

$$[0, x_1), [x_1, x_1+x_2), [x_1+x_2, x_1+x_2+x_3), \dots$$

Liczba m , wylosowana z rozkładu równomiernego na odcinku $[0, 1)$ należy do któregoś z opisanych podprzedziałów. Umożliwia to jednocześnie wyznaczyć następny stan obiektu.

Należy podkreślić, że powyższy algorytm nie uwzględnia wszystkich warunków, jakie występują w rzeczywistym systemie eksploatacji autobusów; na przykład nie jest uwidoczniiony fakt, że autobusy jeżdżą przez 19,5 godziny w czasie doby, a przez 4,5 godziny znajdują się w zajezdni. Program symulacyjny został jednak napisany z uwzględnieniem tych zależności.

W procesie symulacji uwzględniono również to, że generowany czas jazdy autobusu jest znacznie dłuższy niż czasy generowane w stanach innych niż S_1 . Powoduje to, że zdarzenie uszkodzenia autobusu w procesie symulacji zachodzi raz na kilka dni. Uwzględniając ten fakt w programie symulacyjnym wprowadzono procedurę „Koniec dnia”, którą realizuje się wówczas, gdy bieżący dzień pracy obiekt kończy w stanie S_{13} (tj. Stanu obsługi codziennej). W następnym dniu obiekt znajduje się w stanie S_1 (na początku dnia) z czasem jazdy zmniejszonym o tę wartość, która została zrealizowana w dniach poprzedzających. W chwili, gdy uplynie wygenerowany czas jazdy obiektu z prawdopodobieństwem wynikającym z wygenerowanej liczby m i pierwszego wiersza macierzy przejść, obiekt zmienia swój stan S_1 na stany $(S_{21} \vee S_{41} \vee S_6)$.

W obecnym stanie rozwoju modelu celem głównym było sprawdzenie wyników wygenerowanych w procesie symulacji dla dwóch grup autobusów o istotnie różnych parametrach eksploatacyjnych, tzn. dla grupy autobusów starych i nowych. Jako wskaźnik oceny przyjęto tę część całkowitego czasu symulacji, którą stanowi czas jazdy. Z danych obserwacyjnych oraz danych uzyskanych z badań procesu eksploatacji wynika, że wskaźnik ten ma wartość większą dla autobusów nowych. Oznacza to, że wyniki uzyskane z badania modelu symulacyjnego są zgodne z wynikami rzeczywistymi.

5. WYNIKI PRZEBIEGÓW SYMULACJI

W przebiegach symulacyjnych dla grupy autobusów nowych i starych, parametrem różniącym była średnia pozostawania w stanie S_1 (jazdy). Odchylenie standardowe, oraz średnie czasów jazdy i ich odchylenia standardowe w pozostałych stanach przyjęto za jednakowe dla obu grup.

Dla każdej z grup przeprowadzono po pięć przebiegów symulacyjnych (przy liczności zbioru równej 100 autobusów). Uzyskane wyniki przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Wybrane wyniki badań symulacyjnych

Wskaźnik	Przebieg 1		Przebieg 2		Przebieg 3		Przebieg 4		Przebieg 5	
	Stare	Nowe	Stare	Nowe	Stare	Nowe	Stare	Nowe	Stare	Nowe
Łiść awarii	37.91	29.95	38.08	30.33	37.80	29.96	38.18	29.95	37.90	29.87
% czasu jazdy	92.91	94.53	92.89	94.44	92.85	94.13	93.19	94.37	92.73	94.45

Aby móc sprawdzić hipotezę, że w obu przebiegach symulacyjnych uzyskano istotnie różne średnie wartości wskaźnika, przeprowadzono test dla dwóch średnich z hipotezą:

H_0 : średnie w obu przebiegach są równe;

H_1 : średnia dla starych jest mniejsza.

Na podstawie wyników pięciu symulacji obliczone zostały średnie wartości wskaźnika. Wynoszą one $m_1=92,91$ i $m_2=94,38$ odpowiednio dla starych i nowych autobusów. Wariancje obliczone z próby odpowiednio mają wartości $s_1^2=2,45$ oraz $s_2^2=1,72$.

Korzystając ze statystyki:

$$U = \frac{m_1 - m_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (n_1 \text{ i } n_2 \text{ oznaczaj' licznosc' prób}),$$

która przy założeniu prawdziwości hipotezy H_0 ma rozkład normalny $N(0, 1)$, otrzymujemy jej wartość równą **-16,07**.

Przyjmując poziom istotności $\alpha = 0,01$ (to znaczy zakładając, że prawdopodobieństwo odrzucenia testowanej hipotezy H_0 , mimo że jest prawdziwa, jest równe 0,01) i odczytując z tablicy rozkładu normalnego wartość krytyczną u_α ze względu na lewostronny obszar krytyczny otrzymujemy wartość $u_\alpha = -2,33$. Widzimy więc, że znaleźliśmy się w obszarze krytycznym, czyli testowaną hipotezę o równości średnich należy odrzucić.

Zauważmy przy tym, że nawet dla bardzo małego poziomu istotności $\alpha = 0,001$ też należałoby ją zdecydowanie odrzucić. Możemy więc stwierdzić, że otrzymana różnica średnich (1,47) jest statystycznie istotna.

6. ROZWÓJ MODELU

Dalsze prace nad rozwojem modelu mogą być prowadzone w wielu kierunkach. Jednym z nich jest parametryzacja modelu polegająca na możliwości określania w bardziej dogodny sposób danych wejściowych, tzn. parametrów rozkładów, wyboru generatorów, jak również modyfikacji macierzy prawdopodobieństw przejść pomiędzy stanami.

Możliwe są tu przynajmniej dwa podejścia:

- wprowadzanie zmian z klawiatury bezpośrednio po rozpoczęciu symulacji;
- wcześniejsze przygotowanie danych w postaci plików o odpowiednim dla programu formacie i użyciu ich jako parametrów w momencie wywołania programu symulacyjnego.

Innym kierunkiem wzbogacania modelu jest wbudowanie modułu do badania tworzących się w niektórych stanach kolejek (stany: S_{31} , S_{32} , S_{41} , S_{42}). Pozwoli to dokonywać oceny stanu wykorzystania stanowisk diagnostycznych i warsztatowych i podejmować decyzje co do ich ewentualnej rozbudowy lub ograniczenia.

Sprawą, która powinna być także rozwiązana, jest odpowiedni sposób prezentacji wyników (oraz zwiększenie ilości wskaźników wyjściowych). Możliwa powinna być także przejrzysta prezentacja graficzna stanu systemu, w dowolnej chwili przebiegu symulacyjnego, lub tylko pewnych jego istotnych podsystemów.

LITERATURA

- [1] Greń Jerzy: Statystyka matematyczna modele i zadania. PWN, Warszawa 1974.
- [2] Fishman George S.: Symulacja komputerowa pojęcia i metody. PWE, Warszawa 1981.
- [3] Moore P.G.: Wprowadzenie do badań operacyjnych. WNT, Warszawa 1973.
- [4] Zieliński Ryszard: Generatory liczb losowych. WNT, Warszawa 1979.
- [5] Zeigler Bernard P.: Teoria modelowania i symulacji. PWN, Warszawa 1984.
- [6] Woropay M., Knopik L., Landowski B.: „Model symulacyjny optymalizacji procesu realizacji celów systemu eksploatacji”. VII Konferencja Naukowa nt.: „Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych”. Warszawa-Wrocław-Stalowa Wola-Zakopane, styczeń 1994. Druk: MCNEMT, Radom 1994, s. 289-298.
- [7] Woropay M., Knopik L., Landowski B.: „Wpływ zmian wartości wybranej zmiennej sterującej na efektywność procesu eksploatacji systemów technicznych”. IV Międzynarodowe Seminarium nt.: „Efektywność eksploatacji systemów technicznych”. Olsztyn, 24-26.04.1997. Druk: ART, Olsztyn 1997.
- [8] "Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn". Praca zbiorowa pod redakcją M. Woropaya. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 1996.

THE SIMULATION ANALYSIS OF THE MAINTENANCE PROCES IN THE METROPOLITAN TRANSPORT SYSTEM

Summary

The model of maintenance and operation proces realised in the metropolitan transport system as wellas the method for simulation program design are presented in the paper. The verification of this simulation program is also completed.

TRÓJSTANOWY MODEL PROCESU EKSPLOATACJI

Maciej Woropay, Leszek Knopik, Bogdan Landowski

Wydział Mechaniczny ATR
Katedra Eksploatacji Maszyn
ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz

W pracy rozważa się uproszczony model procesu eksploatacji obiektów technicznych realizowany w pewnej klasie systemów transportowych. Proces eksploatacji opisany jest w kategorii stanów i możliwych przejść pomiędzy stanami. Stany procesu scharakteryzowane są rozkładami czasu przebywania oraz zyskami (stratami) jednostkowymi związanymi z przebywaniem obiektu w danym stanie. Zasadniczym celem pracy jest analiza funkcji celu wyrażającej zysk na jednostkę czasu związany z działaniem systemu transportowego. W pracy przedstawiono przebieg zmian funkcji celu w zależności od rodzaju i parametrów rozkładu czasu przebywania obiektu technicznego w stanie użytkowania.

Słowa kluczowe: System transportowy, proces eksploatacji, model procesu eksploatacji, proces stochastyczny, proces semi-Markowa, stan użytkowania, stan odnowy, stan diagnozowania.

1. WPROWADZENIE

W trakcie prowadzenia prac dotyczących modelowania i symulacji procesu eksploatacji obiektów technicznych realizowanego w systemach transportu miejskiego pojawił się problem związany z tzw. diagnozowaniem wyprzedzającym. Najogólniej problem ten można sformułować następująco:

- w jaki sposób modelować wpływ diagnozowania wyprzedzającego na efektywność (w sensie ekonomicznym) procesu eksploatacji;
- jak wyznaczać optymalną (w sensie przyjętego układu kryteriów) chwilę diagnozowania wyprzedzającego metodami statystycznymi.

Dla ułatwienia rozważań dotyczących zasygnalizowanego problemu w pracy przedstawia się uproszczony model procesu eksploatacji obiektów technicznych wykorzystany do badania wpływu zmiennej decyzyjnej t_P (tzw. wartości progowej - związanej z diagnozowaniem wyprzedzającym) na zysk (stratę) wynikający z działania systemu eksploatacji. Prezentowana problematyka dotyczy procesu eksploatacji pojazdów realizowanego w rzeczywistych systemach transportowych.

2. OPIS MODELU

Rozważany model opisuje ograniczoną liczbę stanów procesu eksploatacji obiektów technicznych wyróżnionych z wielostanowego procesu na podstawie kryterium istotności stanów (kryterium zysków). Z punktu widzenia przyjętego celu poddano analizie 3 następujące stany modelu:

S_1 - stan użytkowania;

S_2 - stan obsługiwanego (odnowa);

S_3 - stan diagnozowania.

Przedstawione stany S_k , $k = 1, 2, 3$, modelu odpowiadają stanom eksploatacyjnym obiektów technicznych.

Analizowany proces stochastyczny, będący modelem procesu eksploatacji, w danej chwili t może znajdować się tylko w jednym z powyższych stanów.

Działanie modelu jest opisywane za pomocą procesu stochastycznego $X(t)$. Jeśli $X(t) = k$; gdzie $k = 1, 2, 3$, to rozpatrywany obiekt techniczny znajduje się w stanie S_k .

Czasy przebywania obiektów w poszczególnych stanach S_k są określone poprzez niezależne zmienne losowe T_i , $i = 1, 2, 3$. Z każdym ze stanów S_k związana jest wielkość z_i , $i = 1, 2, 3$ wyrażająca zysk (dodatni lub ujemny), wytworzony poprzez jeden użytkowany obiekt w ustalonej jednostce czasu.

Proces $X(t)$ można opisać za pomocą macierzy prawdopodobieństw przejść $P = [p_{ij}]$; $i, j = 1, 2, 3$ i czasów T_i , $i = 1, 2, 3$ przebywania w stanach S_1, S_2, S_3 . Zakłada się, że proces $X(t)$ jest szczególnym przypadkiem procesu semi - Markowa.

Jako zmienną decyzyjną przyjęto czas T_1 przebywania w stanie S_1 określony następująco:

$$T_1(p) = \begin{cases} T_1, & \text{jesli } T_1 \leq p, \\ p, & \text{jesli } T_1 > p, \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

p - czas przebywania w stanie S_1 zwany dalej progiem, po którym następuje zeterminowane przejście do stanu S_3 .

Skracanie czasu przebywania obiektu w stanie S_1 celem jego diagnozowania prowadzi do zmiany macierzy P . Zmodyfikowaną macierz prawdopodobieństw przejść oznaczono przez $P(p) = [p_{ij}(p)]$, $i, j = 1, 2, 3$. Korzystając ze wzoru na prawdopodobieństwo całkowite dla $p_{12}(p)$ oraz dla $p_{13}(p)$ otrzymujemy:

$$p_{12}(p) = p_{12} F_1(p), \quad (2)$$

$$p_{13}(p) = p_{13} F_1(p) + \overline{F_1}(p) \quad (3)$$

gdzie:

$F_1(p)$ - dystrybuanta czasu T_1 przebywania w stanie S_1 ,

$\overline{F_1}(p) = 1 - F_1(p)$.

Dla $i \geq 2$ $p_{ij}(p) = p_{ij}$, $j = 1, 2, 3$.

3. ANALIZA MODELU

Podstawowym celem analizy modelu jest zbadanie wpływu zmiennej decyzyjnej p na zysk wynikający z działania systemu transportowego. Jako funkcję kryterialną rozważa się zysk przypadający na jednostkę czasu. Dla systemów działających w dostatecznie długim przedziale czasu za pracę [1] można przyjąć:

$$h(p) = \frac{ET_1(p) \cdot p_1^* \cdot z_1 + ET_2 \cdot p_2^* \cdot z_2 + ET_3 \cdot p_3^* \cdot z_3}{ET_1(p) \cdot p_1^* + ET_2 \cdot p_2^* + ET_3 \cdot p_3^*}, \quad (4)$$

gdzie:

- $h(p)$ - oznacza zysk osiągany przez system eksploatacji przypadający na jednostkę czasu i na 1 eksploatowany obiekt techniczny;
 $z_i, i = 1, 2, 3$ - oznacza zysk na jednostkę czasu związany z przebywaniem obiektu technicznego w stanie $S_k, k = 1, 2, 3$;
 $p_i^*, i = 1, 2, 3$ - oznacza prawdopodobieństwa ergodyczne dla tzw. włożonego łańcucha Markowa z macierzą prawdopodobieństw przejść $P(p) = [p_{ij}(p)], i, j = 1, 2, 3$;
 $ET_1(p)$ - oznacza wartość średnią zmiennej losowej $T_1(p)$;
 $ET_i(p) = ET_i, i = 2, 3$.

Wartość średnią $ET_1(p)$ zmiennej losowej T_1 wyznacza się ze wzoru:

$$ET_1(p) = \int_0^p tf_1(t)dt + pP\{T_1 \geq p\}, \quad (5)$$

gdzie:

$f_1(t)$ - oznacza gęstość zmiennej losowej T_1 .

Całkując prawą stronę równania (5) przez części otrzymujemy:

$$ET_1(p) = \int_0^p \overline{F_1(p)} dt. \quad (6)$$

W celu wyznaczenia prawdopodobieństw ergodycznych rozwiązuje się następujący układ równań liniowych:

$$\begin{bmatrix} -1 & p_{21} & p_{31} \\ p_{12}(p) & -1 & p_{32} \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1^* \\ p_2^* \\ p_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Rozwiązanie układu równań (7) jest następujące:

$$\begin{aligned} p_1^*(p) &= (p_{21} \cdot p_{32} + p_{31})/M, \\ p_2^*(p) &= (p_{12}(p) \cdot p_{31} + p_{32})/M, \\ p_3^*(p) &= (-p_{12}(p) \cdot p_{21} + 1)/M, \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie:

$$M = p_{12}(p)(p_{31}-p_{21}) + 2 + p_{21}p_{32},$$

$$p_{12}(p) = p_{12} \cdot F_{12}(p).$$

Funkcja $h(p)$ po uwzględnieniu prawdopodobieństw ergodycznych danych wzorami (8) ma postać:

$$h(p) = \frac{z_1 \cdot A \cdot ET_1(p) + z_2 B_1 F_1(p) + C_1}{A \cdot ET_1(p) + B F_1(p) + C}, \quad (9)$$

gdzie:

współczynniki A, B, C, B_1, C_1 wyrażają się wzorami:

$$A = p_{21} \cdot p_{32} + p_{31},$$

$$B = p_{31} \cdot ET_2 - p_{21} \cdot ET_3,$$

$$B_1 = p_{31} \cdot z_2 \cdot ET_2 - p_{21} \cdot z_3 \cdot ET_3,$$

$$C = p_{32} \cdot ET_2 - ET_3,$$

$$C_1 = p_{32} \cdot z_2 \cdot ET_2 - z_3 \cdot ET_3.$$

Warunek konieczny istnienia ekstremum (maksimum) funkcji $h(p)$ jest postaci: $h'(p) = 0$. Dla funkcji $h(p)$ danej wzorem (9) warunek ten jest równoważny warunkowi postaci:

$$p_{12}(B_1 - z_1 B) [f_1(p)ET_1(p) - \bar{F}_1(p)F_1(p)] + \bar{F}_1(p)(z_1 C - C_1) = 0. \quad (10)$$

Rozwiązanie tego równania dla rozkładów różnych od rozkładu wykładniczego można uzyskać jedynie za pomocą metod numerycznych.

Z postaci warunku (10) można wyciągnąć następujący wniosek dotyczący funkcji celu $h(p)$:

Wniosek 1

Jeśli zmienna losowa T_1 ma rozkład wykładniczy, to:

$$f_1(p)ET_1(p) = \bar{F}_1(p) \cdot F_1(p). \quad (11)$$

Z (10) i (11) wynika, że funkcja $h(p)$ nie osiąga ekstremum w przypadku, gdy zmienna losowa T_1 ma rozkład wykładniczy.

Jeśli dla zmiennej losowej T prawdziwy jest warunek (11) i zmienna ta jest skoncentrowana na przedziale $< 0, +\infty)$ z gęstością $f(t)$, dystrybuantą $F(t)$ spełniającą warunek $F(0) = 0$, to zmienna losowa T ma rozkład wykładniczy.

Na podstawie powyższego wniosku stwierdzamy, że warunek (11) charakteryzuje rozkład wykładniczy.

Zakładając, że dla każdego $p \in (0, +\infty)$ zachodzi $\bar{F}_1(p) \neq 0$, warunek (10) można przedstawić w postaci:

$$\lambda(p)ET_1(p) - F_1(p) = (C_1 - z_1 C) / (p_{12}(B_1 - z_1 B)), \quad (12)$$

gdzie:

$\lambda(t) = \frac{f_1(t)}{F_1(t)}$ jest funkcją intensywności uszkodzeń.

Lewą stronę wzoru (12) oznaczamy przez $g(t)$, tzn.:

$$g(t) = \lambda(t)ET_1(t) - F_1(t). \quad (13)$$

Z tego, że $ET_1(0) = 0$ i $F_1(0) = 0$ wynika oczywisty wniosek:

$$g(0) = 0. \quad (14)$$

Jeśli zmienna losowa T_1 ma skończoną wartość średnią i funkcja intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ jest rosnąca do $+\infty$ przy $t \rightarrow \infty$, to funkcja $g(t)$ rośnie do $+\infty$. Biorąc pod uwagę fakt, że prawa strona równania (12) nie zależy od p , wnioskujemy, że dla zmiennych losowych z rosnącą funkcją intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ spełniony jest dla pewnego $t_0 \in (0, \infty)$ warunek konieczny istnienia ekstremum (maksimum) funkcji celu $h(p)$. Oznacza to, że dla rozkładów uwzględniających proces starzenia obiektu technicznego, funkcja celu $h(p)$ posiada wartość ekstremalną (maksimum), a więc celowa jest optymalizacja zmiennej p .

4. PRZYKŁADY OBLICZEŃ

a) dla rozkładu lognormalnego

Zmienna losowa T ma rozkład lognormalny, jeśli jej gęstość prawdopodobieństwa wyraża się wzorem:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln t - m)^2}{2\sigma^2}\right) \text{ dla } t > 0, \sigma > 0. \quad (15)$$

W celu wyznaczenia wartości funkcji celu $h(p)$ trzeba opracować metody wyznaczenia wartości dystrybuanty $F_1(p)$ i wartości średniej $ET_1(p)$ zmiennej losowej $T_1(p)$.

Z definicji dystrybuanty mamy:

$$F_1(p) = P\{T_1 < p\} = P\{\ln T_1 < \ln p\}.$$

Z tego, że zmienna losowa T_1 ma rozkład lognormalny z parametrami m i σ wynika, że zmienna losowa $\ln T_1$ ma rozkład normalny z parametrami m i σ , symbolicznie fakt ten zapisujemy następująco: $\ln T_1 \sim N(m, \sigma)$.

Przez $\Phi(u)$ oznacza się zwykle dystrybuantę rozkładu normalnego standardowego, tzn. rozkładu ze zmienną $U \sim N(0, 1)$. Dystrybuanta $\Phi(u)$ wyraża się wzorem:

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp(-t^2/2) dt.$$

Jest wiele dostępnych algorytmów (procedur) wyznaczających wartości funkcji $\Phi(u)$. Dystrybuanta $F_1(p)$ zmiennej losowej T_1 wyraża się teraz wzorem:

$$F_1(p) = \Phi\left(\frac{\ln p - m}{\sigma}\right).$$

Wyrazimy teraz wartość średnią $ET_1(p)$ przez wartości funkcji $\Phi(u)$:

$$ET_1(p) = p - \int_0^p (p-t)f_1(t)dt,$$

gdzie:

$f_1(t)$ oznacza gęstość zmiennej losowej T_1 .

Obliczanie numeryczne całki stojącej po prawej stronie powyższej równości jest kłopotliwe ze względu na nieokreśloność funkcji $f_1(t)$ w punkcie $t = 0$.

Całka:

$$\int_0^p f_1(t)dt \text{ jest równa prawdopodobieństwu } P\{T_1 < p\},$$

stąd:

$$\int_0^p f_1(t)dt = \Phi\left(\frac{\ln p - m}{\sigma}\right).$$

Natomiast dla całki postaci:

$$\int_0^p tf_1(t)dt,$$

podstawiając $x = \ln t$ otrzymujemy kolejno:

$$\int_0^p tf_1(t)dt = \int_{-\infty}^{\ln p} e^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx,$$

$$\int_0^p tf_1(t)dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\ln p} \exp\left(-\frac{(x-(m+\sigma^2))^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(m + \frac{\sigma^2}{2}\right) dx.$$

Z ostatniej równości otrzymamy:

$$\int_0^p tf_1(t)dt = ET_1 \Phi\left(\frac{\ln p - (m + \sigma^2)}{2\sigma^2}\right).$$

Ostatecznie dla $ET_1(p)$ mamy:

$$ET_1(p) = p - p\phi\left(\frac{\ln p - m}{\sigma}\right) + ET_1\phi\left(\frac{\ln p - (m + \sigma^2)}{\sigma}\right).$$

Ostatni wzór pozwala wyznaczać wartości $ET_1(p)$ za pomocą procedur obliczających wartości funkcji $\phi(u)$. Wykresy funkcji celu $h(p)$ dla różnych wartości parametrów (m, σ) , kolejno równych $h1(-0.5, 1)$, $h2(-0.125, 0.5)$, $h3(-0.08, 0.4)$, $h4(-0.045, 0.3)$, $h5(-0.02, 0.2)$, $h6(-0.005, 0.1)$ przedstawiono na rysunku 1. Parametry kolejnych funkcji dobrano tak, aby $ET_1 = 1$.

Obliczenia wykonano dla następujących danych:

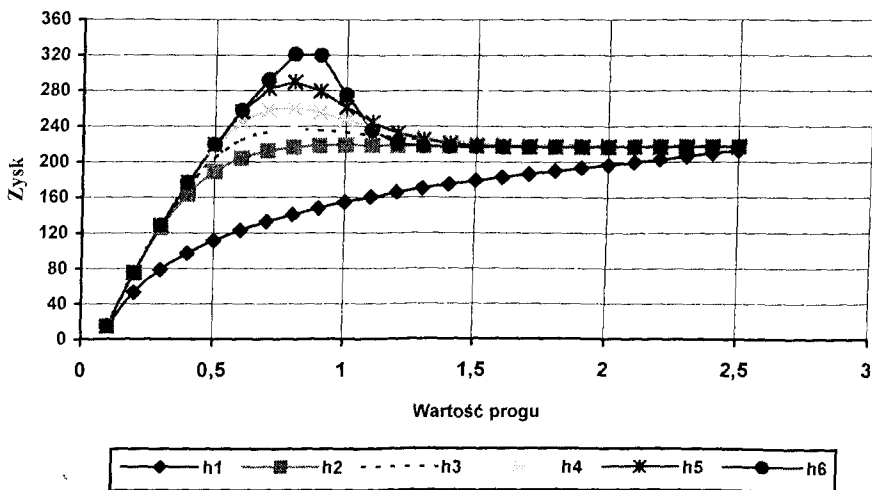
- macierz przejść pomiędzy stanami $P = [p_{ij}]$:

p_{ij}	1	2	3
1	0	0.9	0.1
2	0.2	0	0.8
3	0.8	0.2	0

- wektor zysków jednostkowych: z_i

$$z_1 = 200; \quad z_2 = -1000; \quad z_3 = -40$$

Zysk na jednostkę czasu dla rozkładu lognormalnego



Rys. 1. Zysk jednostkowy w zależności od progu p dla rozkładu lognormalnego

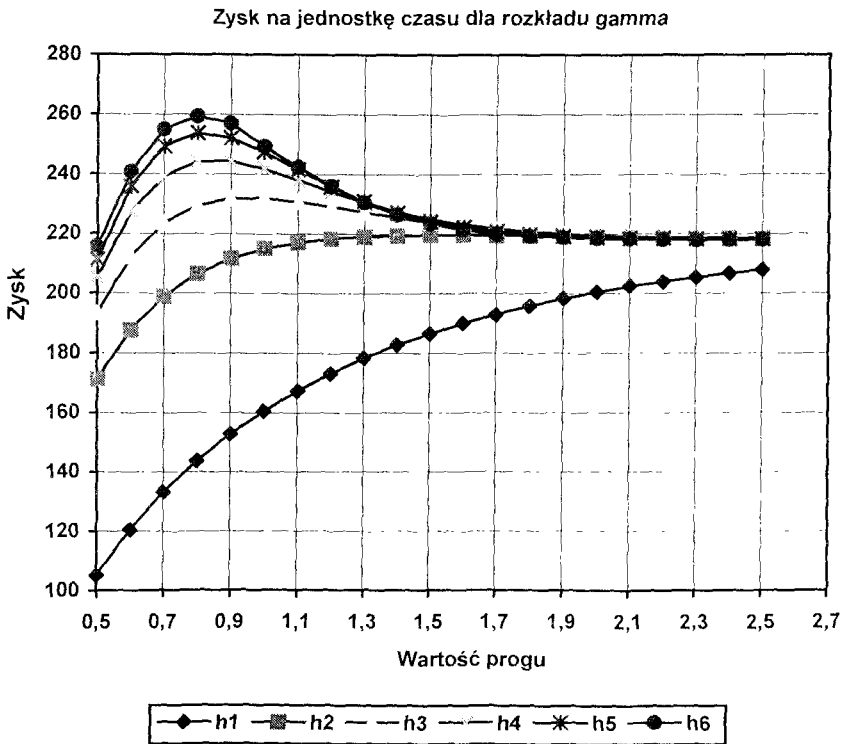
b) dla rozkładu gamma

Zmienna losowa T_1 ma rozkład gamma z gęstością:

$$f_1(t) = \frac{b^r}{\Gamma(r)} t^{r-1} e^{-bt} \quad \text{dla } t > 0, r, b > 0.$$

Fakt ten będziemy zapisywali symbolicznie $T_1 \sim \Gamma(r, b)$. W celu wyznaczenia wartości funkcji celu $h(p)$ wg wzoru (9) dla obliczenia dystrybuanty $F_1(t)$ i wartości średniej $ET_1(p)$ zastosowano procedury całkowania numerycznego. Na rysunku 2 przedstawiono wykresy 6 funkcji $h(p)$ dla parametrów (r, b) równych kolejno: $h_1(1, 1)$, $h_2(3, 3)$, $h_3(5, 5)$, $h_4(7, 7)$, $h_5(9, 9)$, $h_6(11, 11)$. Dla tych wartości parametrów otrzymujemy $ET_1 = r/b = 1$. Dla pierwszej pary parametrów $r = 1, b = 1$ zmienna losowa T_1 ma rozkład wykładniczy.

Dane do obliczeń przyjęto tak jak dla rozkładu lognormalnego.



Rys. 2. Wykres funkcji zysku jednostkowego dla rozkładu gamma

c) dla rozkładu Weibulla

Jako trzeci rozkład zmiennej losowej T_1 analizowano rozkład Weibulla. Zmienna losowa T_1 ma rozkład Weibulla, jeśli jej gęstość $f_1(t)$ ma postać:

$$f_1(t) = bt^{r-1} \exp(-bt^r), \quad \text{dla } t > 0, r, b > 0.$$

Fakt ten będziemy zapisywali symbolicznie $T_1 \sim \text{Weib}(r, b)$.

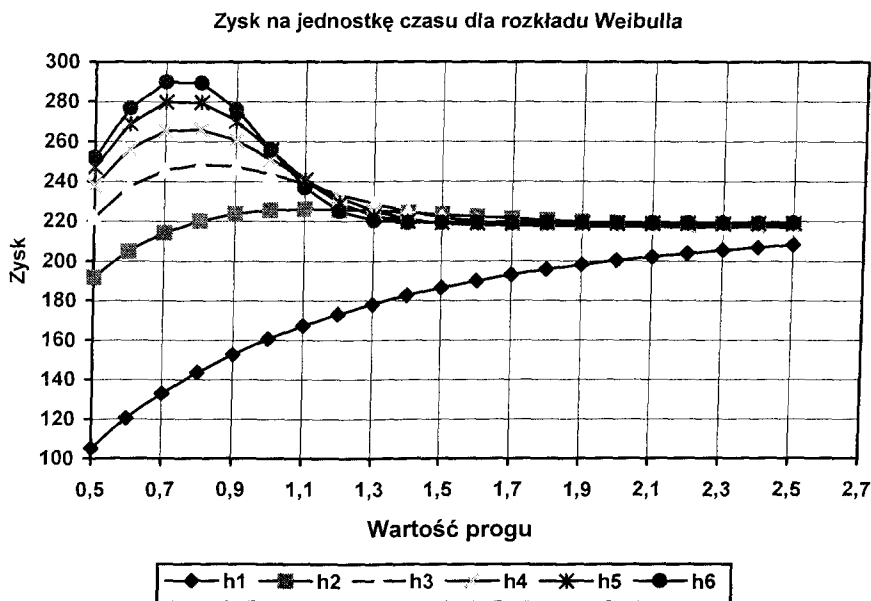
Dla $r = 1$ zmienna T_1 ma rozkład wykładniczy.

Dystrybuanta zmiennej losowej T_1 ma postać:

$$F(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t \leq 0 \\ 1 - \exp(-bt^{r-1}) & \text{dla } t > 0 \end{cases}$$

Wartość średnia $ET_1(p)$ zmiennej losowej $T_1(p)$ wyznaczono numerycznie. Wykreśły funkcji celu $h(p)$ dla różnych wartości parametrów rozkładu (r, b), kolejno równych: $h_1(1, 1)$, $h_2(2, 0.79)$, $h_3(3, 0.72)$, $h_4(4, 0.68)$, $h_5(5, 0.64)$, $h_6(6, 0.62)$ przedstawiono na rysunku 3. Wartości parametrów r i b dobrano tak, aby $ET_1 \cong 1$.

Dane do obliczeń przyjęto tak jak dla rozkładu lognormalnego.



Rys. 3. Wykres funkcji zysku jednostkowego dla rozkładu Weibulla

5. WNIOSKI

W pracy zaproponowano sposób formalnego opisu uproszczonego modelu procesu eksploatacji obiektów technicznych realizowanego w oparciu o strategię, która zakłada skracanie czasu przebywania obiektu w stanie użytkowania celem jego diagnozowania. Przedstawione rozważania mogą stanowić podstawę do optymalizacji zysku na jednostkę czasu w systemach, w których realizowana jest opisywana strategia eksploatacji.

Rozważania teoretyczne i przykłady numeryczne pokazują, że fakt istnienia maksymalnego zysku na jednostkę czasu zależy od własności zmiennej losowej T_1 - czasu przebywania w stanie S_1 - intensywnego użytkowania. W szczególności w pracy pokazano znaczenie funkcji intensywności uszkodzeń dla istnienia maksimum zysku na jednostkę czasu.

W trakcie prowadzonych prac wyznaczono nową charakterystykę rozkładu wykładniczego opisaną zależnością (11).

LITERATURA

- [1] Jewell W.S.: Markov-Renewal Programming I, II Operations Research 11, Nr 6, 938 - 971, 1963.
- [2] Bobrowski D.: Probabilistyka w zastosowaniach technicznych. WNT, Warszawa 1986.
- [3] Woropay M., Knopik L., Landowski B.: „Model symulacyjny optymalizacji procesu realizacji celów systemu eksploatacji”. VII Konferencja Naukowa nt.: „Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych”, Warszawa-Wroc³aw-Stalowa Wola-Zakopane, styczeń 1994. Druk: MCNEMT, Radom 1994, s. 289-298.
- [4] Woropay M., Knopik L., Landowski B.: „Wpływ zmian wartości wybranej zmiennej sterującej na efektywność procesu eksploatacji systemów technicznych”. IV Międzynarodowe Seminarium nt.: „Efektywność eksploatacji systemów technicznych”. Olsztyn, 24-26.04.1997. Druk: ART, Olsztyn 1997.

THREE-STATES MODEL OF MAINTENANCE PROCESS

Summary

The model of the technical objects maintenance process carried out in a certain class of transportation systems is considered in this paper. The maintenance process is outlined in the category of the states and possible transitions between the states. The states of the process are characterised by time distributions as well as by unit profits (losses) related to the existence of an object in a certain state. The essential aim of the paper is to make a thorough analysis of the purpose function expressing profit per time unit related to transportation system operation. The course of function changes dependent on the kind and parameters of the time distribution of existence of the technical object being in the state of use was presented in the paper.

METODA BUDOWY MODELU WSTĘPNEGO ZŁOŻONEGO SYSTEMU TECHNICZNEGO (NA PRZYKŁADZIE AUTOBUSU IKARUS 280)

Maciej Woropaj, Bogdan Landowski, Tomasz Cieszyński

Wydział Mechaniczny ATR
Katedra Eksploatacji Maszyn
ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W opracowaniu przedstawiono podstawowe zasady realizacji procesu dekompozycji systemu technicznego. Sposób stosowania zasad pokazano na konkretnym obiekcie technicznym - autobusie IKARUS 280. Omówiono typowe problemy występujące w trakcie realizacji tego procesu.

Słowa kluczowe: system techniczny, struktura hierarchiczna, dekompozycja

1. WSTĘP

Rozważania przedstawione w niniejszym opracowaniu dotyczą systemów technicznych, których strukturę można przedstawić w oparciu o koncepcję hierarchicznej budowy systemów [6]. Koncepcja hierarchicznej budowy systemów opiera się na założeniu potencjalnej podzielności elementów systemu i różnorodności sprzężeń i relacji. Fakt potencjalnej podzielności elementów danego systemu oznacza, że elementy te mogą być z kolei rozważane jako systemy. Jednocześnie dany system może występować jako element innego, szerszego systemu. Relacje i sprzężenia dowolnego systemu mogą być rozłożone na bardziej elementarne, na podstawie których tworzy się systemy (sprzężenia, relacje) na niższym poziomie.

Wykorzystanie wybranych zasad opisu systemów organizacyjnych i systemów sterowania oraz realizacja dekompozycji systemu technicznego umożliwiała m.in. budowę modeli złożonych systemów technicznych, do badania ich efektywności, uwzględniających zróżnicowaną istotność elementów systemu. Ponadto tak zbudowane modele można wykorzystać w badaniach mających na celu:

- poprawę niezawodności systemów rzeczywistych;
- ocenę bieżącą niezawodności;
- budowę systemów diagnostycznych;
- opracowanie metod diagnostycznych, itd.

2. ZASADY PRZEPROWADZANIA DEKOMPOZYCJI SYSTEMU

Proces podziału złożonego systemu technicznego o budowie hierarchicznej, na podsystemy, odwzorowane na niższych poziomach szczegółowości rozpatrywania nazywać będziemy dekompozycją systemu [3].

Podsystemy, które powstały po zdekomponowaniu systemu, nie muszą charakteryzować się takimi samymi właściwościami (cechami) funkcjonalnymi co system. Często okazuje się, że podsystemy te realizują odmienne działania.

Wydzielenie podsystemów w systemie upraszcza badanie struktury systemu. W wyniku przeprowadzonej dekompozycji złożonego systemu technicznego można ocenić niezawodność i efektywność wybranych elementów, których uszkodzenie ma decydujący wpływ na ograniczenie możliwości realizacji zadań przez system rzeczywisty [5].

Podsystemy, które zostały wyodrębnione w systemie, muszą być podzielone w taki sposób, aby ich suma stanowiła całość. Podziału dokonujemy wg kryterium funkcjonalnego tzn., że każdy z wydzielonych podsystemów realizuje pewne cele cząstkowe, umożliwiające realizację celu globalnego.

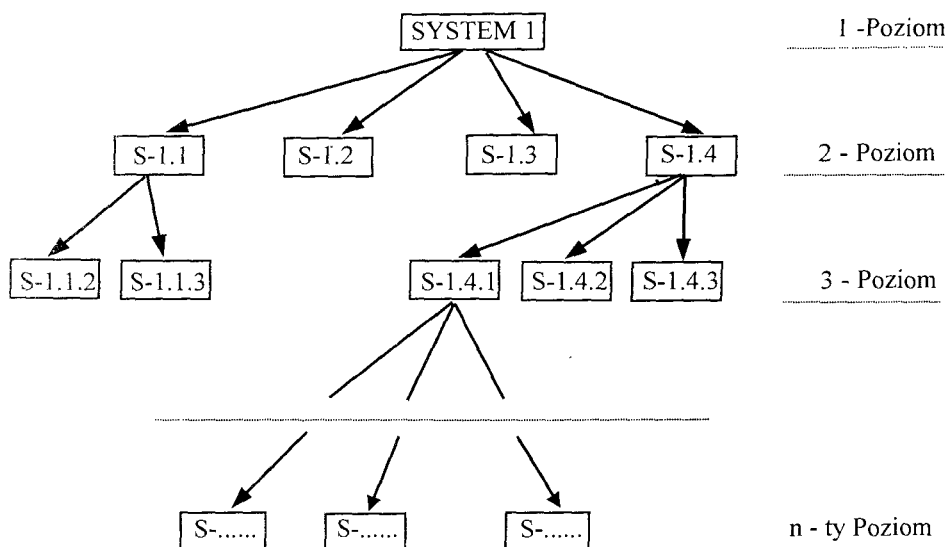
Podział dokonany w wyniku dekompozycji jest przeprowadzony w sposób niejednoznaczny i często umowny. Oznacza to, że liczba podsystemów na każdym poziomie dekompozycji, jak również liczba tych poziomów, jest dowolna i ustalana przez podmiot dokonujący podziału. Dlatego w trakcie podziału systemu na podsystemy należy przestrzegać następujących rygorów metody systemowej [1,4]:

- ścisłości - system powinien być ściśle określony, aby było wiadomo, co do niego należy, a co nie należy;
- niezmienności - określenie systemu powinno być niezmiennie w całym toku rozważań, jest niedopuszczalne, żeby jakieś elementy były czasem traktowane jako należące do systemu, czasem zaś nie;
- zupełności - podział systemu na podsystemy powinien być zupełny, co oznacza, że system nie może zawierać elementów nie należących do żadnego z jego podsystemów, a suma wszystkich podsystemów na danym poziomie dekompozycji musi być równa całemu systemowi;
- rozłączności - podział systemu na podsystemy powinien być rozłączny, oznacza to, że podsystem nie może zawierać elementów należących do kilku podsystemów naraz (element przynależy dokładnie tylko do jednego podsystemu);
- funkcjonalności - podsystemy powinny być wyodrębnione ze względu na spełniane funkcje, a nie ze względu na rozmieszczenie przestrzenne;
- hierarchiczności - każdy system może być rozpatrywany jako podsystem lub element innego, bardziej złożonego systemu zwanego nadsystemem lub super-systemem.

2.1. Postać graficzna zdekomponowanego systemu

Zdekomponowany system S można przedstawić w postaci grafu skierowanego, który pokazano na rys.1, [1].

W grafie tym istnieje otwarta droga, od wierzchołka do elementarnych podsystemów. Przedstawiony graf zdekomponowanego systemu ukazuje wybrane związki, zachodzące między systemem a jego podsystemami, rozmieszczonymi na różnych poziomach dekompozycji.

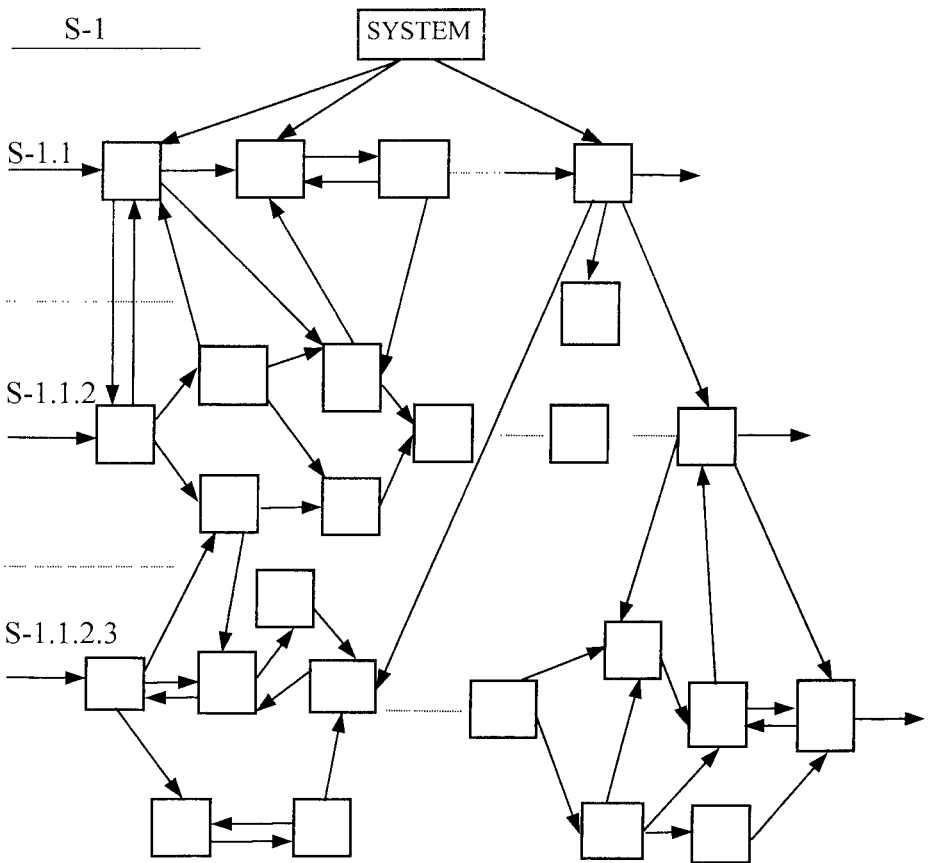


Rys. 1. Graficzne przedstawienie zdekomponowanego systemu [1]

W trakcie podziału systemu na podsystemy dekomponujemy również relacje i sprzężenia na bardziej elementarne, a także ustalamy relacje między podsystemami usytuowanymi na różnych poziomach dekompozycji (rys.2), przy czym ustalenie takie jest w pewnym stopniu arbitralne i zależy od przyjętego punktu widzenia.

Biorąc powyższe pod uwagę można określić następujące własności złożonego systemu technicznego [4]:

- złożony system techniczny posiada globalny cel działania oraz cele lokalne, odpowiadające jego podsystemom;
- realizacja celów lokalnych prowadzi do realizacji celu globalnego, co nie oznacza, że cel globalny jest sumą celów lokalnych;
- ilość relacji i podsystemów jest uzależniona od celu dekompozycji;
- stopień poznania systemu wzrasta przy sukcesywnym przechodzeniu z jednego poziomu na drugi, tzn. im niższy poziom rozpatrujemy, tym bardziej szczegółowo poznajemy system, natomiast gdy rozpatrujemy wyższe poziomy, tym bardziej zrozumiałym się staje cel funkcjonowania podsystemu, oraz jego znaczenie w systemie którego jest dekomponentem;
- z zasady dekompozycji systemu wynika, że z ruchem ku górze maleje liczba relacji oraz maleje liczba podsystemów, natomiast zwiększa się ich znaczenie;
- relacje pomiędzy podsystemami na tym samym poziomie dekompozycji (tzw. poziome) wynikają z zależności funkcjonalnych między podsystemami, natomiast relacje między podsystemami usytuowanymi na różnych poziomach (tzw. pionowe) wynikają z roli tych podsystemów w systemie;
- ograniczając rozważania do zbioru podsystemów z jednego poziomu dekompozycji, które traktujemy wówczas jako zbiór pełny elementów systemu, pomijamy relacje pionowe i zawężamy nasze rozpatrywania do układu relacji poziomych, tracąc możliwość oceny znaczenia tych podsystemów w systemie.



Rys.2. Graficzne przedstawienie relacji zachodzących między podsystemami w systemie [1]

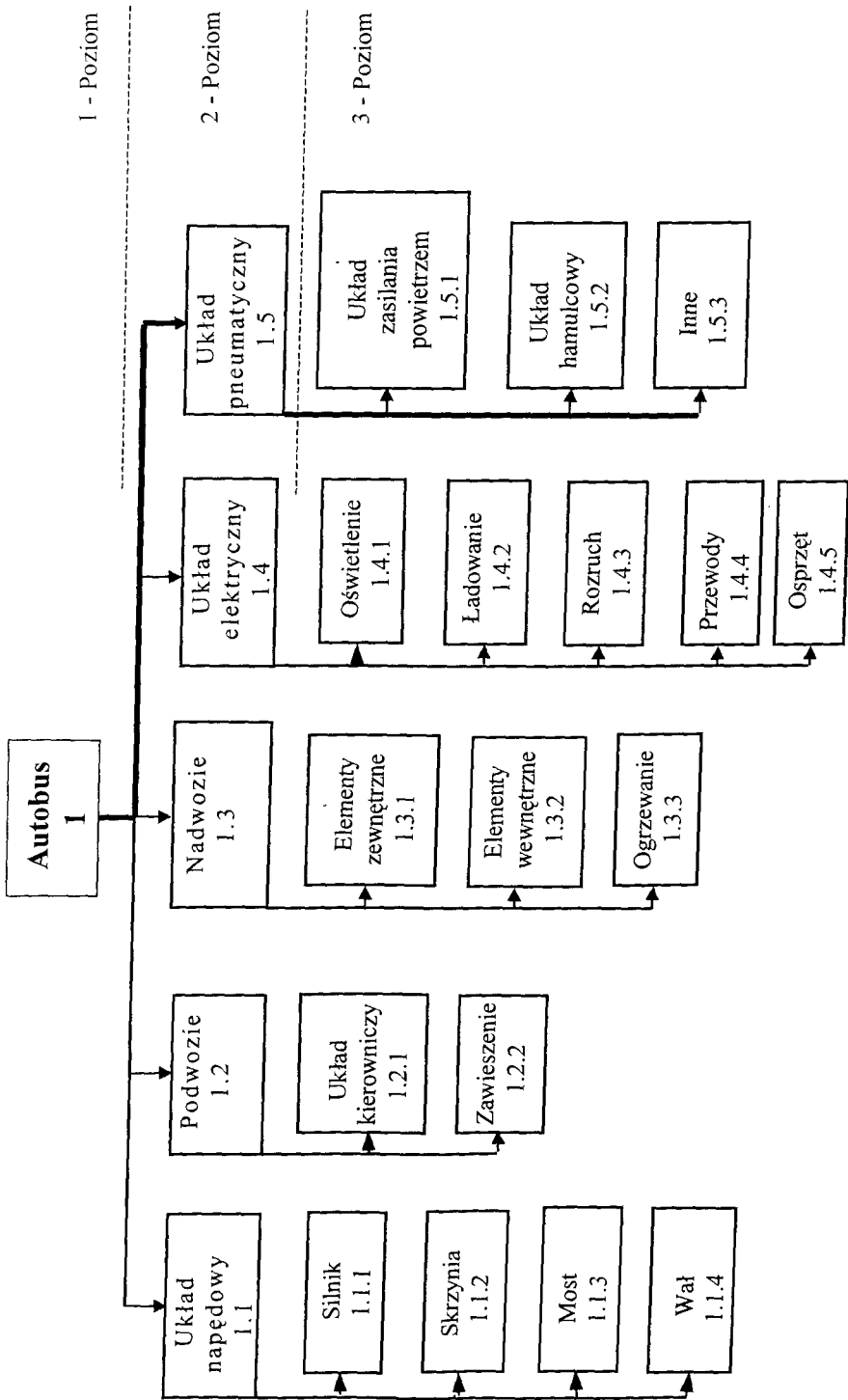
3. DEKOMPOZYCJA SYSTEMU TECHNICZNEGO NA PRZYKŁADZIE AUTOBUSU MIEJSKIEGO

Dekomponowany obiekt jest to autobus przegubowy typu Ikarus 280. Dekompozycję obiektu przeprowadzono po zapoznaniu się z dokumentacją techniczną, katalogami producenta, a także po przeprowadzeniu konsultacji z pracownikami technicznymi Miejskich Zakładów Komunikacyjnych.

Jako kryterium podziału autobusu na podsystemy przyjęto podstawowe funkcje (realizowane zadania) pełnione przez wyróżnione podsystemy. Ponadto w trakcie dekompozycji uwzględniono specyfikę konstrukcji tego typu obiektów technicznych.

Na rysunku 3 przedstawiono trzy poziomy dekompozycji badanego obiektu.

Ze względu na złożoną budowę tego typu obiektu (duża liczba podzespołów i elementów), w pracy przedstawiono kolejne poziomy dekompozycji dla wybranych podsystemów na oddzielnych rysunkach. Na przykład układ pneumatyczny znajdujący się na drugim poziomie dekompozycji zdekomponowano na:



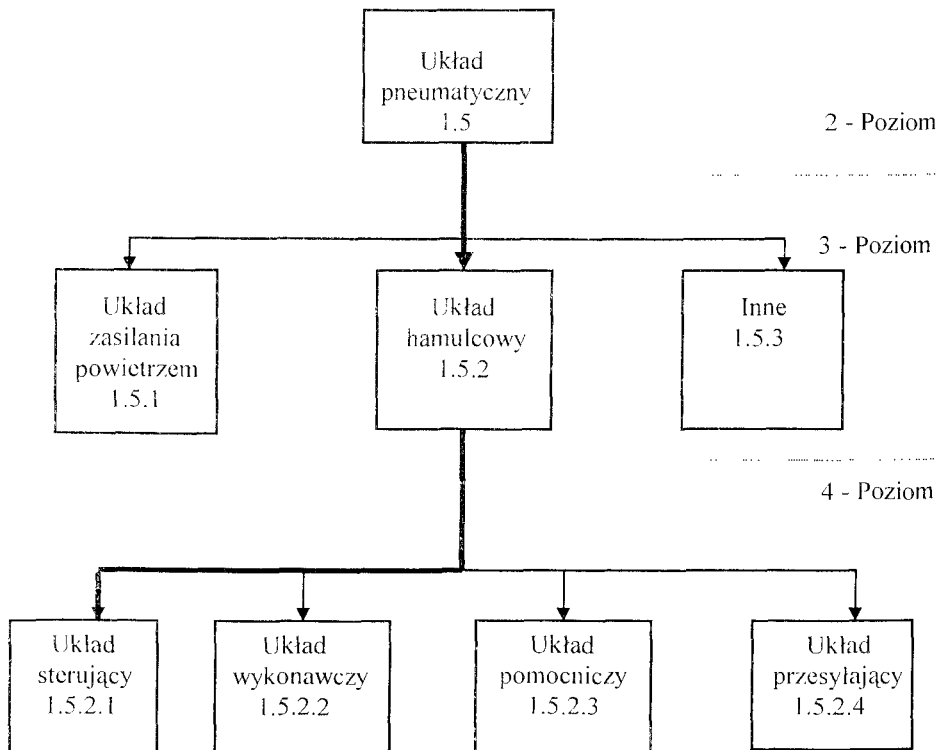
Rys. 3. Schemat zdekomponowanego autobusu

- układ zasilania powietrzem;
- układ hamulcowy;
- inne.

Układ hamulcowy znajdujący się na trzecim poziomie zdekomponowano na:

- układ sterujący;
- układ wykonawczy;
- układ pomocniczy;
- układ przesyłający.

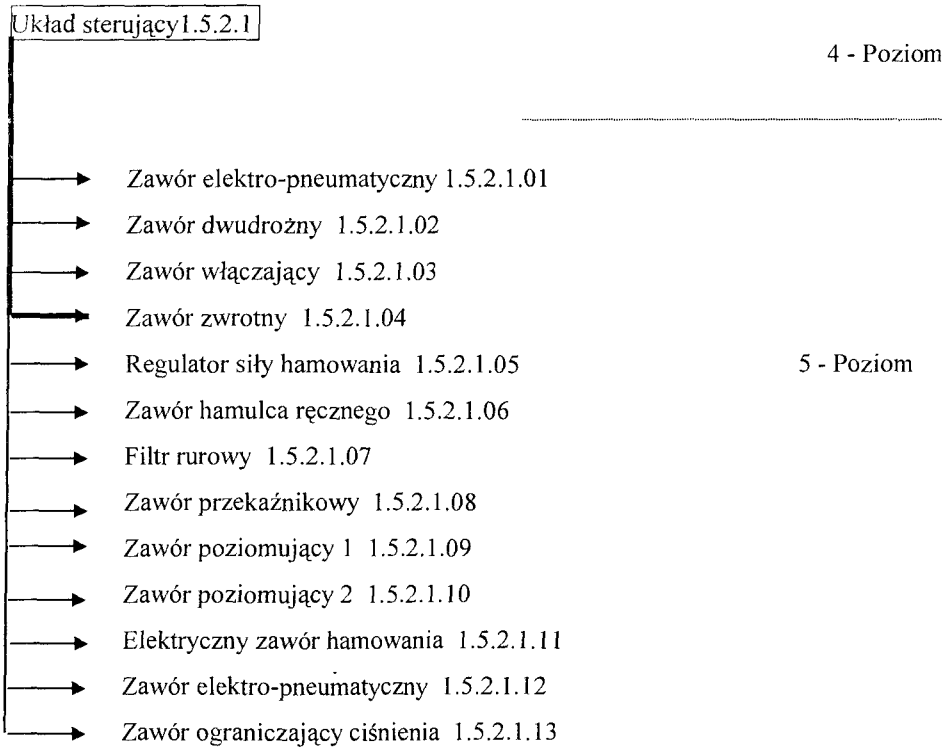
Omówione poziomy dekompozycji układu pneumatycznego przedstawiono na rys. 4.



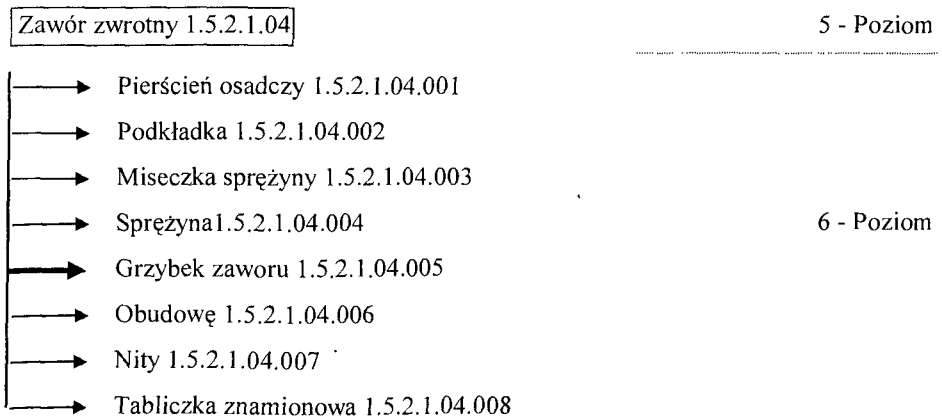
Rys. 4. Schemat dekompozycji układu pneumatycznego

Kolejne poziomy dekompozycji tj. 4, 5 i 6 dla wybranych podsystemów przedstawiono na rys.5 i rys.6.

Najniższym poziomem dekompozycji obiektu badań jest poziom 6. Na tym poziomie występują elementy niepodzielne (umownie).

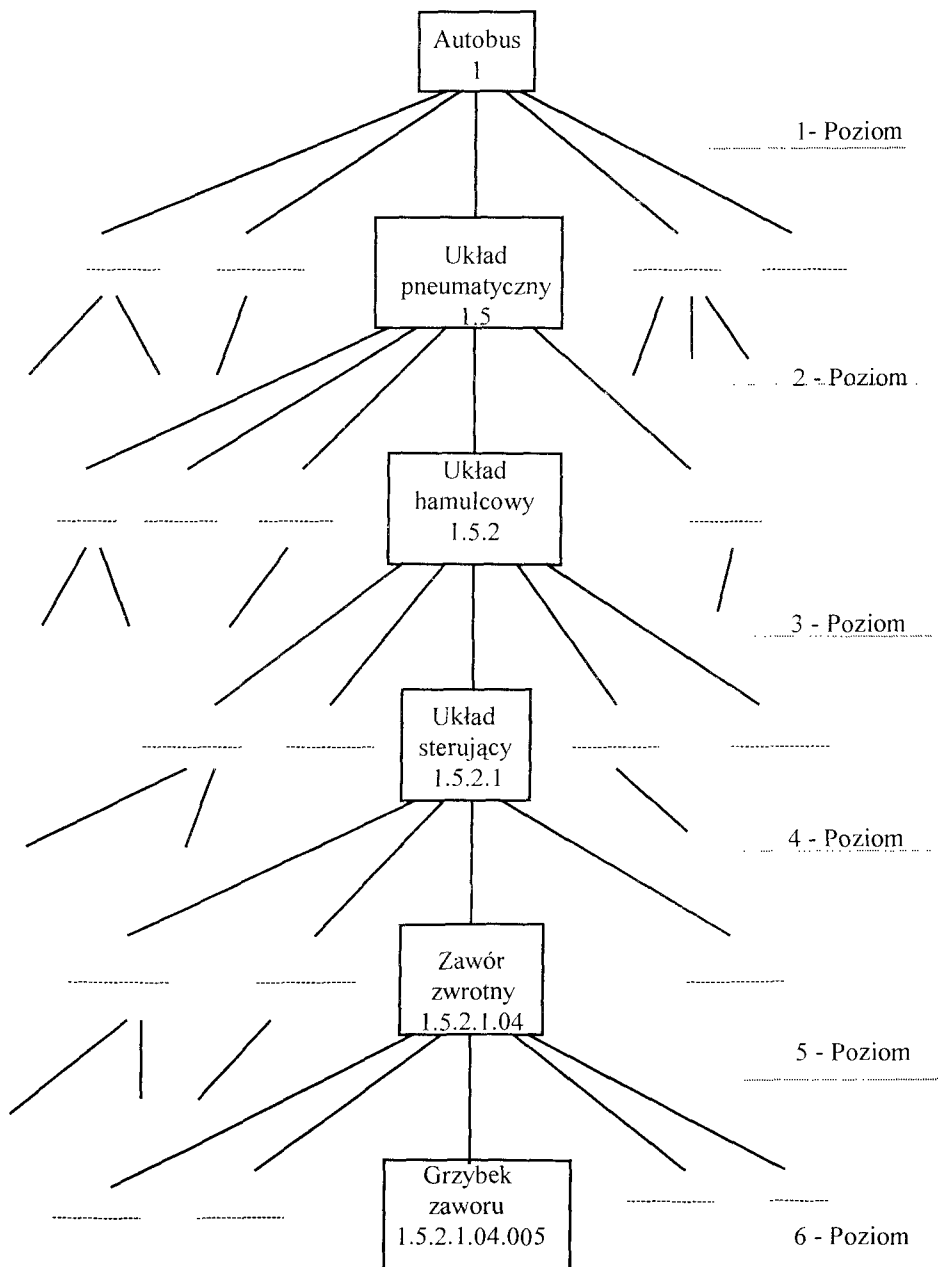


Rys. 5. Schemat dekompozycji układu sterującego



Rys.6. Schemat dekompozycji zaworu zwrotnego (5-ty poziom)

Z przedstawionych rozważań wynika, że dla badanego obiektu wyróżniono sześć (1 - 6) poziomów dekompozycji, co pokazano na rys.7.



Rys.7. Fragment pełnej dekompozycji autobusu IKARUS 280

Podczas przeprowadzania dekompozycji autobusu, poszczególne podsystemy oznaczono odpowiednimi kodami adresowymi, które identyfikują podsystemy, jakie powstały w wyniku podziału całego systemu.

Przyjęto kod adresowy składający się z części jedno-, dwu- i trzycyfrowej. Pełny kod elementu znajdującego się na ostatnim (6) poziomie można przedstawić następująco:

1.2.3.4.55.666,

gdzie:

- 1, 2, 3, 4 - cyfry oznaczające system znajdujący się odpowiednio na 1, 2, 3 i 4 poziomie dekompozycji;
- 55 - liczba oznaczająca piąty poziom podziału;
- 666 - liczba określająca kod adresowy elementarnego niepodzielnego podsystemu znajdującego się na szóstym poziomie.

Zasada kodowania według tej metody i przykład przedstawiono poniżej. Cyfry oznaczają składowe pełnego kodu elementu niepodzielnego - grzybka zaworu.

1.5.2.1.04.005,

gdzie:

- 1. - dekomponowany system (autobus);
- 5. - podsystem na pierwszym poziomie dekompozycji - układ pneumatyczny;
- 2. - układ hamulcowy znajdujący się na drugim poziomie;
- 1. - podsystem znajdujący się na czwartym poziomie - układ sterujący;
- 04. - podsystem znajdujący się na piątym poziomie dekompozycji - zawór zwrotny;
- 005. - niepodzielny element znajdujące się na ostatnim poziomie dekompozycji - grzybek zaworu.

Kod elementu w sposób jednoznaczny określa położenie podsystemu w całym systemie.

W zależności od celu i zakresu badań eksploatacyjnych można operować kodem skróconym odpowiednio do przyjętej rozdzielczości badań, tj. w zależności od najniższego poziomu dekompozycji, którego dotyczą badania. Zaletą przyjętego sposobu kodowania jest łatwość analizy (w tym wyznaczania wskaźników syntetycznych, agregowania podsystemów itp.) wyników badań eksploatacyjnych.

4. UWAGI DOTYCZĄCE DEKOMPOZYCJI AUTOBUSU

Podczas przeprowadzania procesu dekompozycji wynikły następujące problemy:

- a) zakwalifikowania podsystemów znajdujących się na niższych poziomach dekompozycji do podsystemów leżących na wyższych poziomach;
- b) różnorodności wersji obiektu dekomponowanego;
- c) elementów powtarzających się w systemie;
- d) niejednakowej liczby poziomów dekompozycji dla różnych podsystemów.

Problemy te zostały omówione w dalszej części opracowania oraz zostały przedstawione sposoby ich rozwiązania.

a) Podczas podziału systemu na niższe poziomy powstała trudność w zakwalifikowaniu podsystemów wielofunkcyjnych, które świadczą usługi (realizują zadania) kilku podsystemom znajdującym się na wyższym poziomie. Dlatego zaklasyfikowanie ich do określonego systemu jest z reguły arbitralne.

W analizowanym przykładzie brano pod uwagę udział zadań realizowanych przez podsystemy niższego poziomu „dla” poszczególnych podsystemów (systemów) poziomu wyższego.

b) Problem ten można sformułować następująco: jak zrealizować dekompozycję obiektu technicznego występującego w kilku wersjach wykonania.

Proponuje się dwa sposoby realizacji dekompozycji tego typu obiektów:

- pierwszy polega na wykonaniu dekompozycji dla danej wersji wykonania autobusu i przyjęcia jej jako wzorca. Dekompozycja pozostałych wersji autobusu sprowadza się do wykonania kopii wzorca i wprowadzeniu występujących różnic między wersjami;
- drugi polega na wykonaniu wzorca w oparciu o wszystkie wersje wykonania autobusu. Oznacza to, że wzorec nie odnosi się do konkretnej wersji pojazdu, lecz jest „szkieletem” dla wszystkich wersji. Tak zbudowany wzorec zostaje uzupełniony o elementy występujące w poszczególnych wersjach wykonania.

c) W trakcie podziału systemu mamy do czynienia z problemem odwzorowania podsystemów jednorodnych (np. cztery układy tłokowo-korbowe silnika).

W takim przypadku układy odwzorowuje się w postaci jednego bloku z jednoznacznym numerem kodowym uzupełnionym o kod licznosci ich występowania.

d) Podczas podziału autobusu na podsystemy wyłonił się problem niejednakowej liczby faktycznych poziomów dekompozycji poszczególnych podsystemów („gałęzi”), co byłoby niezgodne z rygorami metody systemowej, w myśl której podział systemu na podsystemy musi być zupełny. Oznacza to, że na każdym poziomie dekompozycji suma wszystkich podsystemów musi być równa całemu systemowi.

Wobec tego przy dekompozycji podsystemów o mniejszej liczbie poziomów, zdecydowano się na powtórzenie danego podsystemu na niższym poziomie - bez jego dekomponowania.

5. WNIOSKI

Dekompozycja złożonych systemów technicznych jest problemem trudnym i w znacznej mierze umownym, wymagającym uwzględnienia wielofunkcyjności niektórych podsystemów oraz specyfiki konstrukcji danej klasy obiektów technicznych.

Rozdzielczość dekompozycji, tj. ilość poziomów dekompozycji oraz stopień złożoności podsystemów znajdujących się na ostatnim wyróżnionym poziomie w oczywisty sposób zależy od jej celu.

Wykonanie zupełnej dekompozycji, tj. takiej, w której na najniższym poziomie dekompozycji znajdują się elementy niepodzielne, ma sens tylko wówczas, gdy w planowanych badaniach będą rejestrowane zdarzenia dotyczące tych elementów. Zupełna dekompozycja, przedstawionego w referacie obiektu badań zawiera się na kilkuset stronach maszynopisu.

LITERATURA

- [1] Woropay M.: Metoda budowy wielopoziomowych systemów do badania niezawodności z elementów o wyznaczonej a priori istotności. Wydawnictwo Akademii Techniczno - Rolniczej, Bydgoszcz 1984.
- [2] Wadim S.: Podstawy ogólnej teorii systemów. PWN, Warszawa 1978.
- [3] Buslenko N.P., Kałasznikow W.W., Kowalenko I.N.: Teoria sytemów złożonych. PWN, Warszawa 1979.
- [4] Praca zbiorowa pod redakcją Woropay M.: Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii i Eksploatacji, Radom 1996.
- [5] Technologii Eksploatacji w Radomiu. Bydgoszcz - Radom 1996.
- [6] Mazur M.: Cybernetyka i charakter. PIW, Warszawa 1976.
- [7] Sadowski W.: Podstawy ogólnej teorii systemów. PWN, Warszawa 1978.

METHOD OF CREATING A PRELIMINARY MODEL
OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEM

Summary

The study presents basic principles of the realisation of a decomposition process for a technical system. The way the principles are to be applied has been shown with the aid of a real technical object, in this case the bus Ikarus 280. Typical problems arising during realisation of this process has been discussed.

WYBRANE ASPEKTY BUDOWY I ZASTOSOWAŃ ZAWORÓW STRUMIENIOWYCH

Václav Tesař*, Kazimierz Peszyński**

*Katedra Mechaniki Płynów i Termodynamiki
Wydział Mechaniczny
ČVUT - Politechnika Czeska w Pradze, Republika Czeska
Technická 4, 166 07 Praha 6

**Katedra Sterowania i Konstrukcji
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-76 Bydgoszcz

W pracy dokonano przeglądu wiedzy w zakresie stosunkowo mało znanego nowego typu zaworów bez mechanicznych elementów ruchomych. Zawory te znajdują coraz większe zastosowanie w kilku dziedzinach techniki, szczególnie tam, gdzie wymagane jest sterowanie strumieniami płynu. Są one przedmiotem badań w Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy w ramach wspólnego projektu badawczego obydwu autorów.

Słowa kluczowe: technika strumieniowa, sterowanie strumienia, zawór, zjawisko Coandy

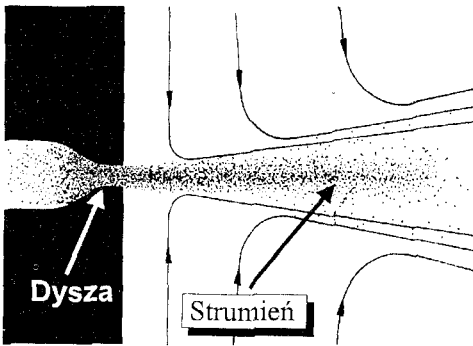
WSTĘP

Do sterowania strumieni płynu w niektórych aplikacjach wykorzystywane są urządzenia nowego typu. Zwane są one zaworami strumieniowymi. Ich cechą charakterystyczną jest brak elementów ruchomych. Zazwyczaj (aczkolwiek nie zawsze) pracują one w oparciu o zasady aerodynamiczne stosowane w miniaturowych wzmacniaczach strumieniowych i innych elementach do obróbki sygnałów. W odróżnieniu od nich, urządzenia strumieniowe o dużych rozmiarach stanowią nowy obszar techniki, nazywany czasami siłową techniką strumieniową. Urządzenia te często łączą w sobie własności elementów sterujących, elementów wykonawczych, a także czujników pomiarowych.

GŁÓWNE ZALETY

- ☞ Niski koszt
- ☞ Niezawodność
- ☞ Bardzo długa żywotność
- ☞ Brak konserwacji
- ☞ Duża częstotliwość operacyjna
- ☞ Niezależność od: wpływów cieplnych, wibracji, ...
- ☞ Doskonała izolacja wewnętrznych przestrzeni
- ☞ Możliwość stosowania materiałów ogniotrwałych

Rys.1. Lista zalet oferowanych przez zawory nowego typu



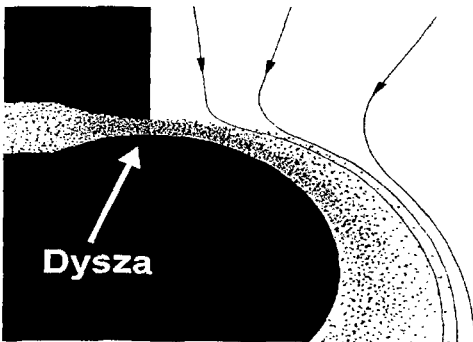
Rys.2. Istota zjawiska porywania otaczającego płynu przez swobodny strumień wypływający z dyszy

go strumienia głównego przy wykorzystaniu małych strumieni sterujących (maksymalizacja współczynnika wzmocnienia).

Generalnym zamierzeniem niniejszej pracy jest jednak wyjaśnienie, czym są i jakie ważne znaczenie mogą mieć tego typu zawory w bliskiej przyszłości. Temu celowi służy przedstawienie zasady ich działania, przedstawienie zalet i wad zaworów strumieniowych, na tle wybranych, dotychczas stosowanych aplikacji.

Działanie sterujące płynu w elementach strumieniowych bazuje na zjawiskach aerodynamicznych. Typowym wykorzystywanym zjawiskiem jest efekt Coandy,

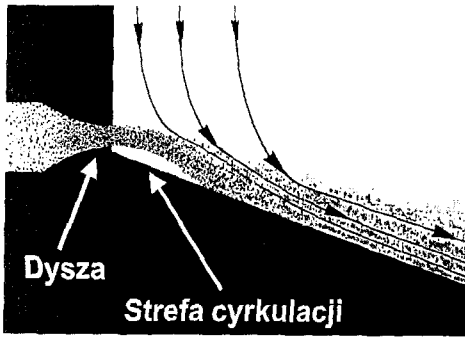
polegający na przyleganiu strumienia płynu wypływającego z dyszy do zakrzywionych ścianek. Wpływ z dyszy (rys.2) spotykany jest w maszynach przepływowych typu: iniektory, ejektory, pompy strumieniowe i podobne urządzenia. Wypływający strumień swobodny porywa cząsteczki płynu znajdującego się w jego okolicy. Jeżeli przestrzeń w okolicy ujścia dyszy zostanie ograniczona przez przylegającą ściankę (rys.3), to uniemożliwia ona zasysanie płynu z okolicy strumienia, co powoduje powstanie różnicy ciśnie-



Rys.3. Zmiana kierunku strumienia wypływającego z dyszy w wyniku zjawiska Coandy

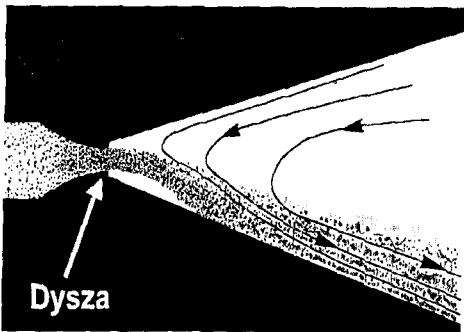
nia w przekroju poprzecznym. Różnica ta wymusza przyleganie strumienia wypływającego z dyszy do ściany. Kierunek osi strumienia różni się od kierunku osi dyszy.

We współpracy obydwu autorów monostabilny osiowosymetryczny zawór strumieniowy badany jest w Katedrze Sterowania i Konstrukcji Wydziału Mechanicznego ATR Bydgoszcz. Jest to układ o konfiguracji przestrzennej. Ponieważ nie można w tym przypadku bezpośrednio przedstawić doświadczeń związanych z budową zaworów płaskich, jego parametry konstrukcyjne wymagają nowych badań. Założonym celem jest opracowanie takiej jego konstrukcji, która będzie zapewniała działanie przekątnikowe z dwoma wyraźnymi stanami stabilnymi. Konstrukcja powinna również zapewniać możliwość sterowania położeniami duże-



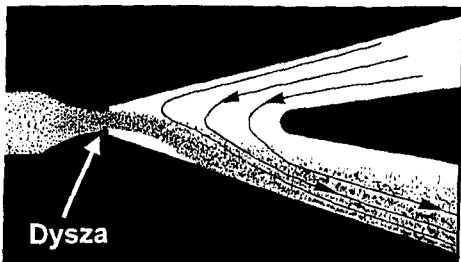
Rys.4. Zjawisko Coandy z utworzeniem się strefy cyrkulacji

położonego między ścianami prowadzi do powstania dwudrogowego elementu rozdzielającego, z możliwością wypływu strumienia z jednego z dwóch kanałów (rys.6).



Rys.5. Bistabilny element wykorzystujący efekt Coandy przylegania strumienia

ków ciśnienia. Z tego względu zawory strumieniowe są zazwyczaj stosowane przy dużych wartościach przepływów, ale przy średnich (rzędu 100 kPa) lub niskich (rzędu 5 kPa) ciśnieniach.



Rys.6. Dwudrogowy zawór rozdzielający powstały przez dodanie klina

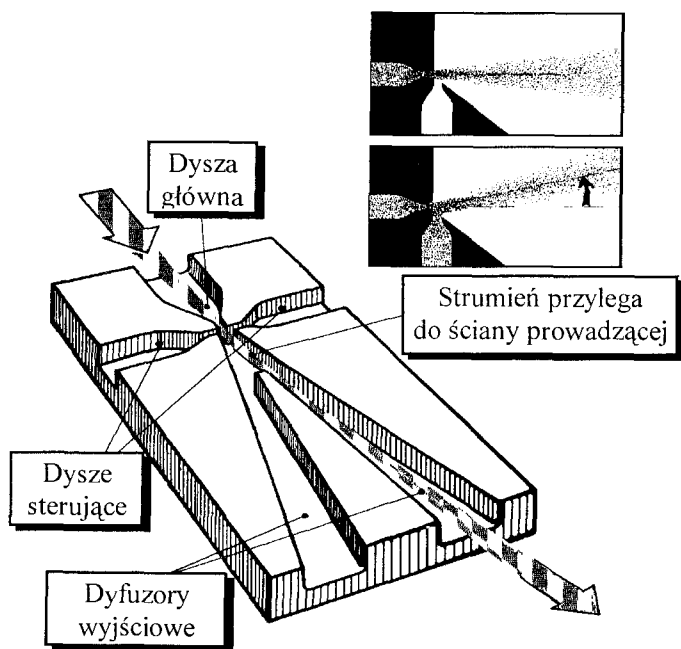
Pod względem aerodynamicznym istnieje pewna różnica między przyleganiem strumienia do ściany bezpośrednio przy ujściu dyszy (rys.3) i przyleganiem do ściany położonej w pewnej odległości od dyszy (rys.4). W tym drugim przypadku powstaje strefa cyrkulacji płynu wzmacniająca efekt przylegania strumienia do ściany.

Wprowadzenie dwóch ścian symetrycznych względem dyszy powoduje powstanie elementu bistabilnego (rys.5) z dwoma ścianami przylegania. Dodanie klina rozdzielającego położonego między ścianami prowadzi do powstania dwudrogowego elementu rozdzielającego, z możliwością wypływu strumienia z jednego z dwóch kanałów (rys.6). Uzupełnienie powstałego elementu kanałami sterującymi zakończonymi dyszami prowadzi do powstania zaworu nowego typu (rys.7), gdzie strumień główny jest kierowany do jednego z dwóch kanałów wyjściowych przez strumień sterujący małej mocy. Jest to zawór rozdzielający wykorzystujący zmianę kierunku strumienia w wyniku jego przylegania do ściany.

Należy jednak podkreślić, że efekty aerodynamiczne, przy braku jakichkolwiek elementów ruchomych, mają trudności z pokonywaniem istnienia bardzo dużych spad-

Istnieją również inne ograniczenia, wśród których należy wymienić występujące często znaczne straty hydrauliczne. W wyniku tego, wprowadzenie i zastosowanie zaworów strumieniowych może być warunkowane rozwiązaniem szeregu problemów - których, mimo ich wszystkich zalet, należy się spodziewać w nowych rozwiązaniach technologicznych. Należy podkreślić, że dla osiągnięcia pełnego suk-

cesu wynikającego ze stosowania zaworów strumieniowych, wymagane są niemałe nakłady finansowe oraz wysiłki badaczy.



Rys.7. Strumieniowy zawór rozdzielający wykorzystujący odchylenie oraz przyleganie swobodnego strumienia do ścian w wyniku zjawiska Coandy

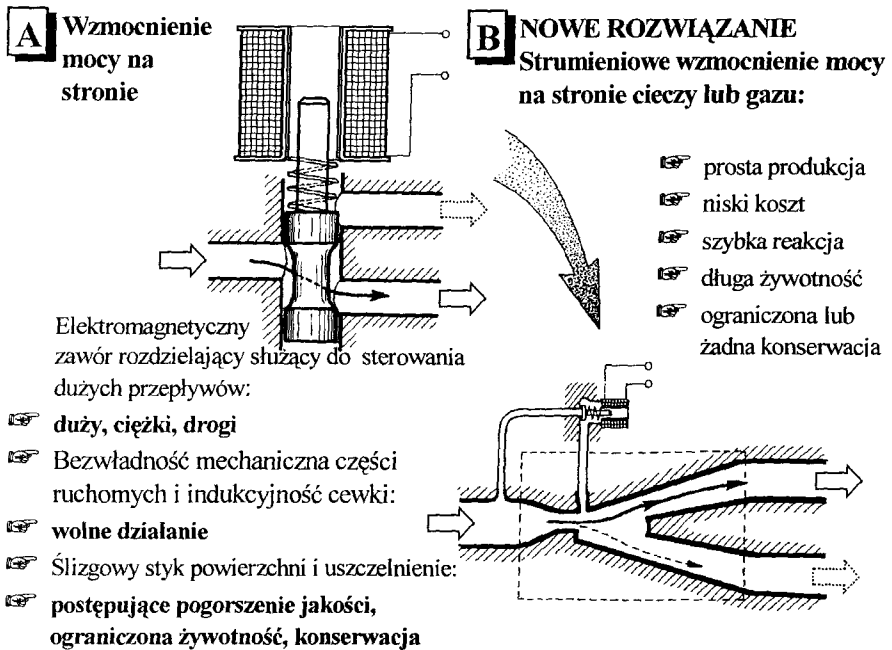
Dlatego nikt nie postuluje zastąpienia wszystkich mechanicznych zaworów przez nowe urządzenia strumieniowe. Zamiast tego, nowoczesne zawory strumieniowe są obecnie badane i stosowane w specjalnych dziedzinach techniki, zazwyczaj do sterowania „trudnych” strumieni (gorących, wywołujących korozję lub radioaktywnych płynów), gdzie zalety zaworów strumieniowych przewyższają poniesione nakłady.

2. ZALETY I ZAKRES ZASTOSOWAŃ ZAWORÓW STRUMIENIOWYCH

Ze względu na brak elementów ruchomych, nowy typ zaworów jest prosty w produkcji. Są one wykonywane bez kosztownych operacji montażowych, a poza tym stosunkowo często mogą być wykonywane jako elementy odlewane, tłoczone, bez jakiegokolwiek obróbki wiórowej. W wyniku tego koszt zaworów nowego typu staje się znacznie niższy niż klasycznych zaworów mechanicznych z elementami ruchomymi.

W zaworach nowego typu brakuje sprężyn, które mogą ulegać złamaniu, brak uszczelnień i dławików, które się zużywają i wymagają okresowej wymiany, brak jest membran, które mogą zostać rozerwane, brak elementów ruchomych, które mogą się blokować oraz ściierać. W wyniku tego, nowy typ zaworów oferuje nieporównywalnie większą niezawodność i długą żywotność, nie ograniczoną przez czas i warunki pracy. Nie wymaga wobec tego częstego sprawdzania, testów, konserwacji.

Ważną cechą jest również niezależność własności nowych zaworów od temperatury, wibracji, efektów radioaktywnych (które mają niekorzystny wpływ na tradycyjne zawory, np. poprzez dekompozycję ich olejów smarujących) i wpływów pola elektromagnetycznego. Stosunkowo prosta jest technologia wykonywania zaworów strumieniowych z twardych i wytrzymałych materiałów. W następstwie tego są to elementy odporne na ścieranie oraz inne szkodliwe zjawiska, wywołane przenoszeniem przez płyny suspensji ze składnikami stałymi. W rzeczywistości, wiele zaworów strumieniowych przepuszcza nawet przenieszone przez płyny relatywnie duże obiekty.



Rys.8. Porównanie własności klasycznych zaworów elektromagnetycznych (A) z własnościami nowych zaworów strumieniowych (B)

Jeżeli wymagane jest stosowanie tych elementów w nadzwyczajnych warunkach pracy, możliwe jest wykonanie zaworów z materiałów ogniotrwałych, przykładowo z materiałów ceramicznych, które czynią z nich elementy odporne na działanie bardzo wysokich temperatur.

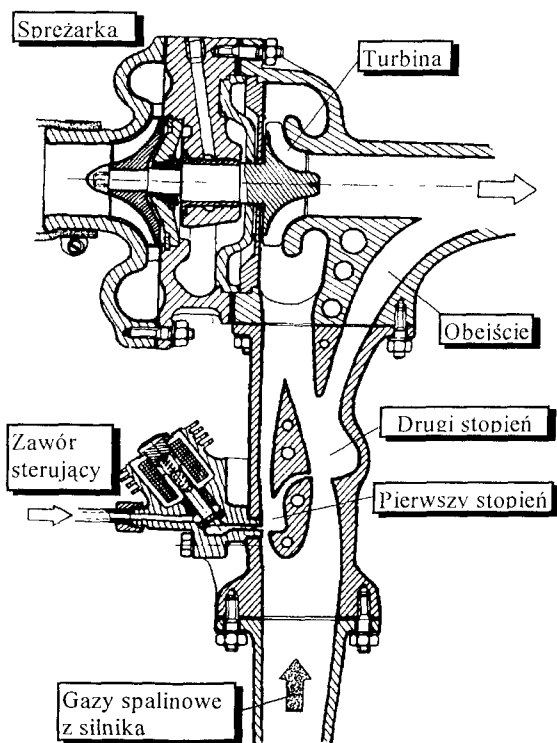
Ze względu na brak mechanicznych wałków lub trzpieni obrotowych przechodzących przez ściany, zawory strumieniowe oferują całkowitą szczelność ich wewnętrznych komór roboczych od otoczenia zewnętrznego. To jest bardzo ważną ich zaletą, w przypadku gdy są przenoszone niebezpieczne płyny (gorące, toksyczne, lub radioaktywne) lub jeżeli należy wykluczyć ewentualne przecieki nie jest konieczne stosowanie dławików.

Oczywiście, brak inercyjności z uwagi na brak elementów mechanicznych oznacza możliwość szybkiego działania. Osiąganie dużych częstotliwości operacyjnych może

być wykorzystane w nowoczesnych operacyjnych modułach sterowania - jak PMS (Pulsacja z Modulacją Strumienia).

Zawory strumieniowe są w zasadzie wzmacniaczami strumieniowymi, ponieważ położenia głównego strumienia mogą być zmieniane przez małe strumienie wpływające z dysz sterujących. Ta własność wzmacniająca umożliwia ich sterowanie przy pomocy sygnałów elektrycznych o niedużej mocy (rys.8). Dzięki własnościom wzmacniającym zaworów strumieniowych, zawór elektromagnetyczny może zostać znacznie zmniejszony. W wyniku zmniejszenia masy elementów ruchomych skraca się ich czas reakcji, obniża koszty. Układ (A) wymaga dużego zaworu elektromagnetycznego o znacznych masach części ruchomych. Układ (B) zezwala na umieszczenie małego zaworu sterującego w pewnej odległości od przepływającego czynnika, co może zapewnić mu dogodniejsze warunki pracy. Następstwem tego jest poprawienie jego żywotności oraz ograniczenie konserwacji.

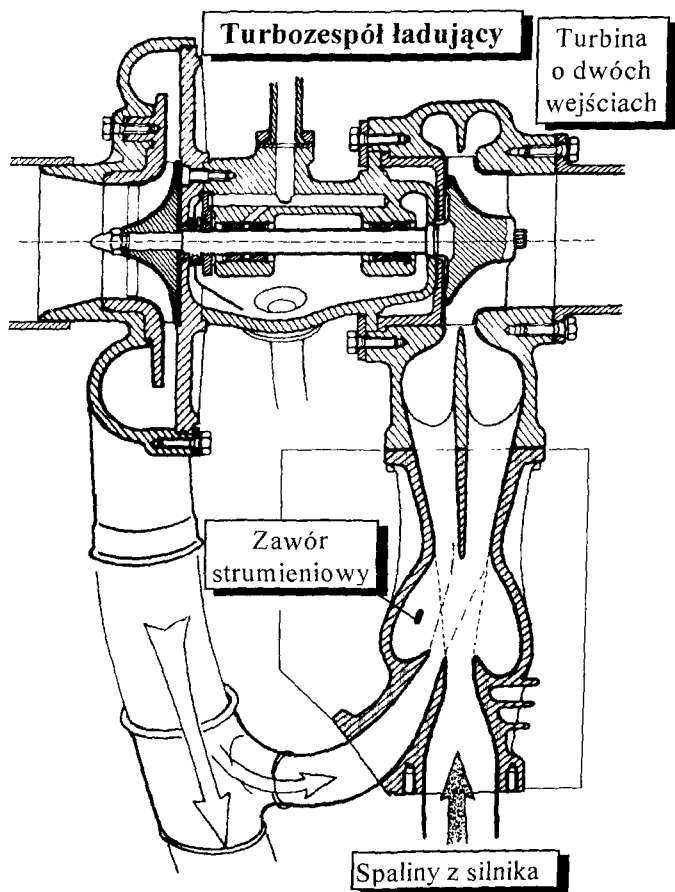
Własności wzmacniające są również podstawą budowy wielopoziomowych układów wzmacniających. W układzie sterowania ciśnienia turbosprężarki (rys.9), zastosowano, po stronie strumieniowej, dwa stopnie wzmacniające sygnał sterujący kontrolowany przy pomocy małego zaworu elektromagnetycznego. Silnik tłokowy i turbosprężarka są maszynami o różnych charakterystykach, który doskonała współpraca jest



Rys.9. Wzmacniające własności zaworów strumieniowych zastosowane w elektrycznie sterowanej przepustnicy turbodoładowania

niemożliwa w całym zakresie stanów funkcjonalnych. Dlatego jest stosowany zawór sterujący. W klasycznym rozwiązaniu przepustnica jest zaworem regulacyjnym bocznikującym część spalin co , wywołuje straty. Parametry turbosprężarki są regulowane przy małych prędkościach obrotowych silnika, wobec czego przy dużych prędkościach obrotowych ciśnienie powietrza napełniającego jest zbyt wysokie. Z tego względu przy wysokich prędkościach obrotowych przepustnica jest otwierana i część spalin kierowana jest obok turbiny. Przepustnica mechaniczna ze względu na trudne warunki pracy ma określoną żywotność. Na rysunku 9 klasyczna przepustnica została zastąpiona zaworem strumieniowym o dwóch stopniach wzmocnienia. Należy odnotować geometryczne podobieństwo komór: małego pierwszego stopnia i dużego drugiego stopnia.

W innym przykładzie wykorzystania techniki strumieniowej (rys.10), sterowanie strumieniem gazów spalinowych umożliwia uniknięcie strat klasycznej bramki odpadowej. Parametry turbosprężarki są wyregulowane przy dużych prędkościach obroto-

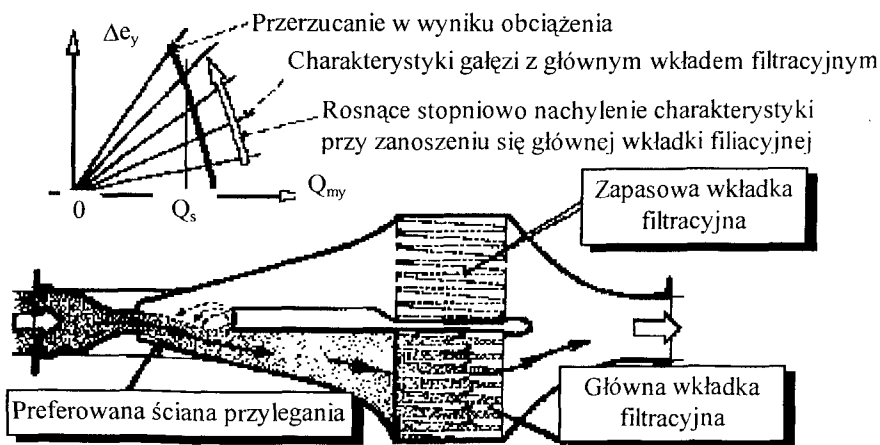


Rys.10. Zawór strumieniowy zastosowany do sterowania nadmiarowej turbosprężarki do samochodowych silników spalinowych

wych silnika na działanie z wysokimi prędkościami - przy małych prędkościach przestrzeń wejściowa turbiny jest ograniczona do korzystania tylko z jednego wejścia. Powoduje to zwiększenie prędkości spalin, w następstwie czego wzrasta prędkość spalin obrotowa, zwiększając obrotową prędkość turbiny. Układ automatycznego sterowania (bez sterownia elektronicznego) wykorzystuje ciśnienie wyjściowe sprężarki jako wielkość odniesienia. Zawory strumieniowe są wytrzymałe, a żywotność mają praktycznie nieograniczoną. Oprócz tego umożliwiają dogodniejszy system sterowania zamiast układu bocznikującego. Do tego celu została wykorzystana standardowa konstrukcja turbosprężarki ze spiralnym korpusem, posiadająca dwie oddzielne komory wejściowe. Ten podział jest wykonywany w innym celu, ma za zadanie oddzielenie pulsacji w dwóch układach spalinowych. Tutaj jednak jest wykorzystywany dodatkowo do tego, aby płyn został doprowadzony tylko na część obwodu wirnika turbiny (podobnie jak jest prowadzony tylko na część obwodu wirnika na rys. 18).

Charakterystyki obciążeniowe zaworów strumieniowych posiadają zwykle złożone przebiegi. To zjawisko z jednej strony jest niekorzystne, ponieważ znacznie komplikuje projektowanie układów. W niektórych przypadkach złożone charakterystyki mogą być jednak wykorzystane do rozwiązania wielu użytecznych problemów.

Na rysunku 11 przedstawiono układ zapewniający automatyczne przzerzucenie strumienia płynu do kanału z filtrem zapasowym przez zawór strumieniowy bez dyszy sterującej, w wyniku zmiany warunków pracy. Jeżeli główny filtr jest czysty, w następstwie zjawiska Coandy, strumień przylgnie do preferowanej ściany kanału prowadzącego do filtra głównego. Po zanieczyszczeniu filtra głównego (wzrost oporów przepływu), przylgnięcie strumienia do preferowanej ściany jest utrudnione i strumień zostanie przzerzuty do kanału z filtrem zapasowym.

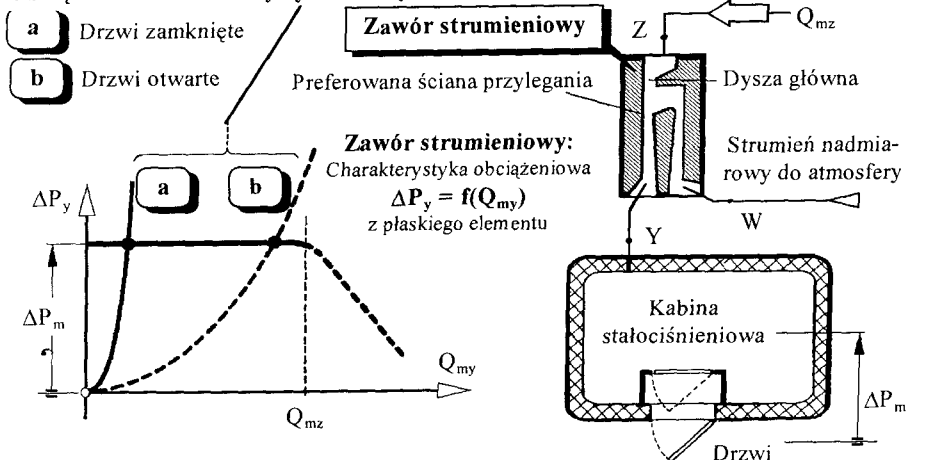


Rys.11. Zmiany położenia strumienia wywołane zwrotnym oddziaływaniem obciążenia zaworu

Na rysunku 12 schematycznie przedstawiono układ regulacji ciśnienia w kabine. Jest to sterowanie w układzie otwartym, gdzie została ponownie wykorzystana charakterystyka obciążeniowa zaworu. Wzrost ciśnienia w kabine powoduje zmianę warun-

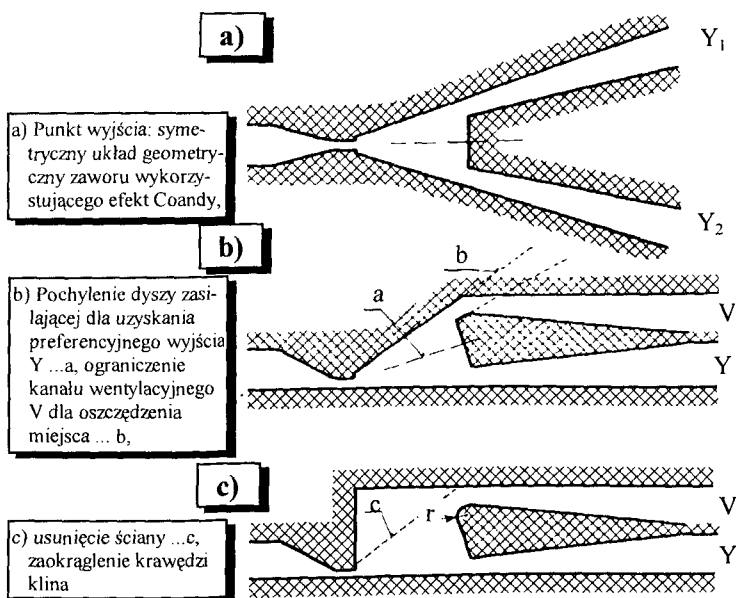
ków pracy, w wyniku czego strumień zostaje przerzucony do kanału wentylacyjnego prowadzącego do atmosfery.

Obciążeniowa charakterystyka kabiny



Rys.12. Układ stabilizacji ciśnienia w przestrzeni zamkniętej

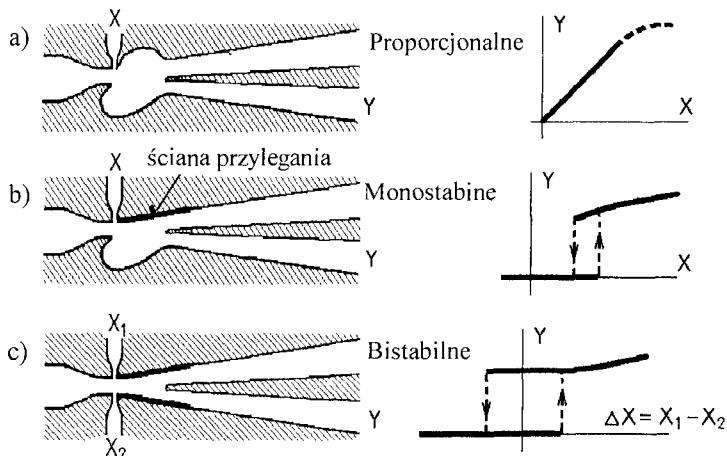
Zawór strumieniowy w tym układzie posiada specjalną konstrukcję. Sposób kształtowania cech geometrycznych przedstawiono na rys.13.



Rys.13. Stopniowy rozwój kształtu geometrycznego biernego regulatora ciśnienia

Przedstawiony na rys.13 bierny zawór regulacyjny jest stopniowo przystosowywaną wersją bistabilnego zaworu rozdzielającego, o kształtach geometrycznych zbliżonych do zaworu przedstawionego na rys.7 (z wyjątkiem dyszy sterującej), pracującego przy wykorzystaniu zjawiska Coandy. Początkowo (rys.13a) był to zawór typowo symetryczny, posiadający dwa ekwiwalentne wyjścia Y1 i Y2. Ponieważ przy realizacji zadania regulatora istotne jest jedynie wyjście Y, a przepływ prowadzony wyjściem wentylacyjnym V może posiadać duże straty, postanowiono pochylić dyfuzor wyjścia V, zmiana „b” (rys.13b). W wyniku tego dochodzi do większych strat, ale w kanale wentylacyjnym nie jest to istotne. Odwrotnie, istotne są małe straty przy prowadzeniu płynu do wyjścia Y oraz stabilizacja położenia w kanale Y. Zostało to osiągnięte przez nachylenie dyszy zasilającej w stosunku do pierwotnej osi symetrii, zmiana „a” (rys. 13b). Następnie okazało się, że zawór regulacyjny można uprościć przez usunięcie ściany podtrzymującej, zmiana „c”, jak to pokazano na rys. 14c.

Układy przedstawione na rys.11 i 12 wykazują, że niezależnie od prostego rozdzielania lub odchylenia strumienia płynu, zawory strumieniowe mogą być wykorzystane do reagowania na zmienne warunki pracy (rys.11) lub do utrzymania stałego spadku ciśnienia (rys.12). Dzięki temu, pojedynczy zawór może zastąpić znacznie bardziej złożone (i znacznie mniej niezawodne) elementy układów sterowania (jak np. regulatory ciśnienia).



Rys.14. Rodzaje rozdzielaczy strumieniowych i ich charakterystyki statyczne

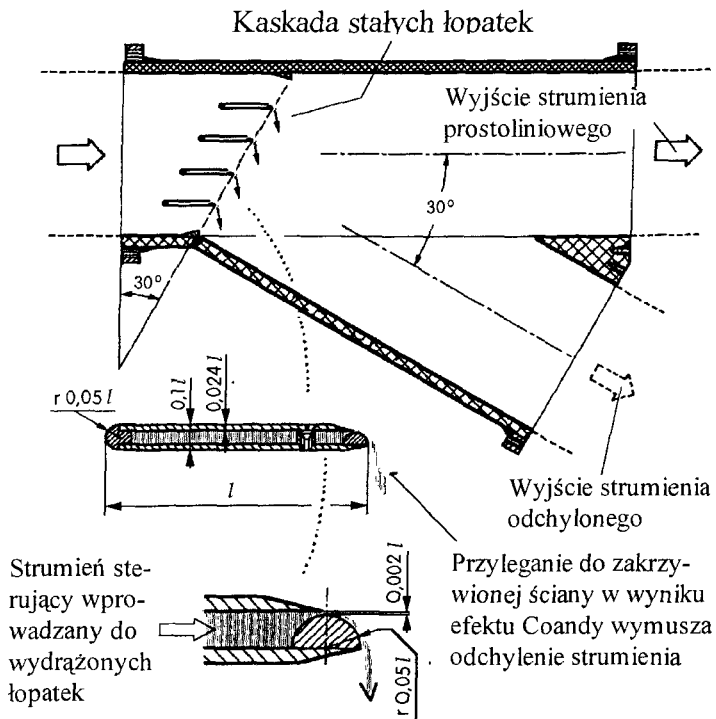
Istnieją zawory strumieniowe, w których linie sprzężeń zwrotnych przekazują sygnał z ich wyjść na wejścia sterujące, wzmacniacz strumieniowy jest przekształcony wówczas w oscylator, nie wymagający żadnych mechanizmów napędowych i dodatkowej energii zewnętrznej do ich napędu. Takie rozwiązania są zastosowane w zaworach oscylujących, służących do podniesienia wydajności różnych procesów w inżynierii chemicznej i sterowaniu procesów technologicznych (jak procesy transportu masy i energii cieplnej). Możliwości intensyfikacji procesu, przez użycie niestacjonarnych strumieni, są faktycznie znane od dawna, ale tradycyjne mechaniczne techniki generowania drgań nie prowadzą do efektywnych ekonomicznie rozwiązań, wobec czego są one obecnie zastępowane przez wykorzystanie techniki strumieniowej.

3. KLASYFIKACJA

Za względu na kształt charakterystyki statycznej można wyróżnić następujące rodzaje zaworów strumieniowych (rys.14):

- proporcjonalne,
- monostabilne,
- bistabilne.

Niektóre zawory działają w sposób ciągły (rys.9). Są one nazywane zaworami proporcjonalnymi (rys.14), choć ich charakterystyka przenoszenia jest często nieliniowa (daleka od prostej liniowej proporcjonalności). Oczywiście ich wadą jest wymóg dużej mocy sterującej, niezbędnej do odchylenia strumienia głównego.



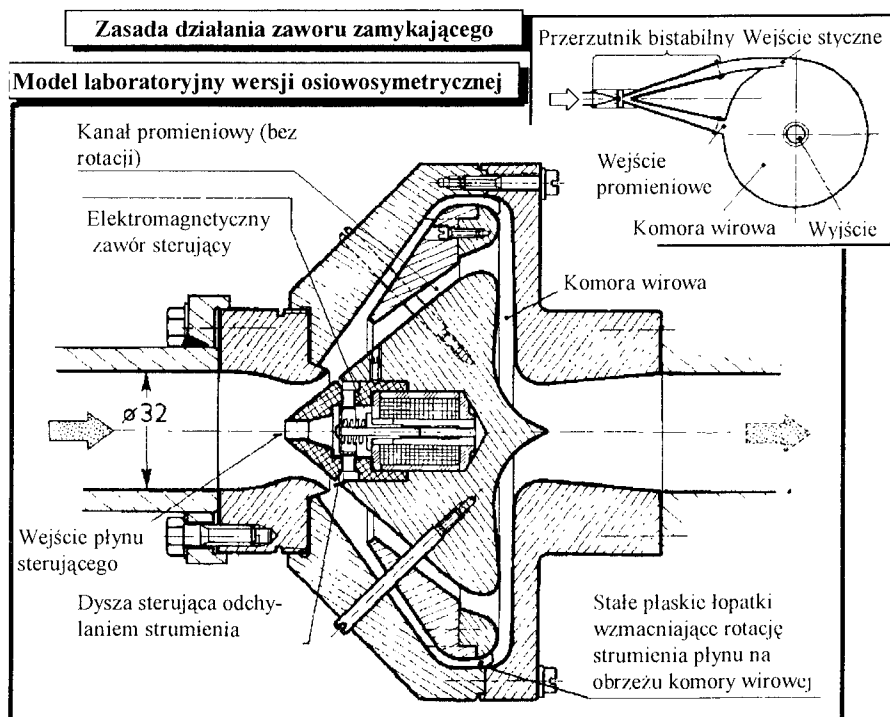
Rys.15. Przykład strumieniowego elementu odchylającego bazującego na efekcie nakładania się strumienia na cyrkulację generowaną przez strumień swobodny uchodzący w pobliżu krawędzi unoszącej stałych łopatek

Zawory bistabilne wykorzystujące zjawisko Coandy (z bardziej lub mniej symetrycznym działaniem wymagają działania sterującego w postaci krótkich impulsów przełączających. Przyleganie do ściany jest również stosowane w zaworach monostabilnych, które w odróżnieniu od elementów bistabilnych, posiadają preferowaną ścianę przylegania (rys.16, 17). Zawory monostabilne są często uważane za atrakcyjniejsze od bistabilnych ze względu na to, że posiadają tylko jedną dyszę sterującą i dzięki temu wymagają w zasadzie prostszego zewnętrznego układu sterowania. Jednakże utrzyma-

nie strumienia w stanie odchylonym od ściany preferowanej wymaga ciągłego działania sterującego. W wyniku tego, nadają się one do aplikacji wymagających dłuższych okresów istnienia strumienia w jednym z dwóch wyjść. Generalnie ich badania są również bardziej złożone, a informacje dotyczące ich właściwości w dostępnej literaturze są skromniejsze.

Zawory strumieniowe mogą służyć jako:

- rozdzielacze strumienia (rys.7, 8, 9),
- zawory odchylające (rys.16),
- elementy stosowane do celów specjalnych, jako oscylatory,
- bierne elementy sterujące (rys.11, 12).



Rys.16. Zawór strumieniowy z strumieniem swobodnym może odchylić strumień z jednego wyjścia do drugiego

Ze względu na wykorzystanie zjawisk aerodynamicznych i hydrodynamicznych zawory są dzielone na:

- zawory z odchylanym strumieniem (stosowane do rozdzielania strumienia, rys. 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13),
- z komorą wirową (umożliwiają zamykanie strumienia rys.16), nadcyrkulacyjne (rys.15),
- bazujące na efektach specjalnych, jak zawory z wirowym pierścieniem zaporowym.

W sytuacji gdy pożądane jest raczej zamknięcie strumienia niż jego odchylenie, możliwe jest połączenie części odchylającej z komorą wirową (rys. 16). Komora wirowa stawia mały opór dla strumienia dopływającego promieniowo. Jeżeli strumień jest wprowadzany stycznie, duża prędkość rotowania w komorze generuje w strumieniu siłę odśrodkową, która (niemal) zapobiega jego przejściu przez zawór.

W zaworach nadcyrkulacyjnych (rys.15) wykorzystywana jest interakcja strumienia sterującego i głównego. Można wykazać [4], że w tym przypadku odchylenie jest dużo bardziej efektywne niż bezpośrednie działanie odchylające, jak na rys.7 lub 14.

Ze względu na własności związane ze sterowaniem zaworów, można je podzielić na:

- zawory aktywne (sterowane) - ich stan jest określony przez zewnętrzny sygnał wejściowy,
- zawory biernie - których stan zależy od charakterystyki obciążeniowej i jest określony przez warunki panujące na wyjściu (rys.11, 12).

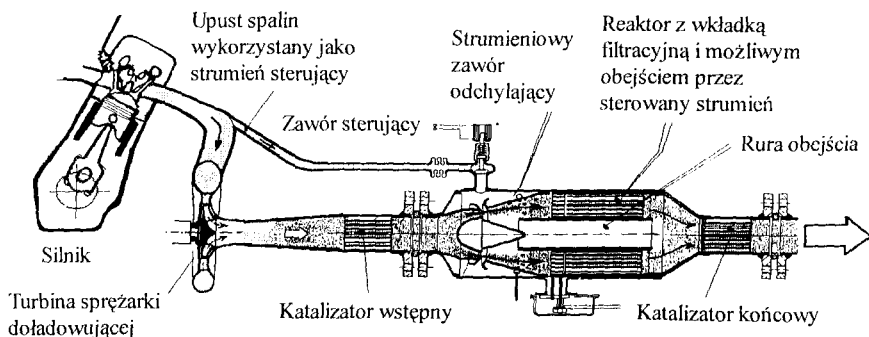
Zależnie od konstrukcji przestrzennej, istnieją:

- zawory płaskie (takie jak na rys.7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15), o konstrukcji powszechnie znanej,
- zawory osiowoosymetryczne (rys.16, 17), o nowej konstrukcji przestrzennej, obecnie intensywnie badanej.

Zawory osiowoosymetryczne mogą prowadzić do bardziej zwartych ogólnych struktur całego systemu i są szczególnie przydatne do zintegrowania w jednym korpusie z elementem stanowiącym obciążenie (rys.17).

4. ZINTEGROWANA KONSTRUKCJA

Integracja zaworów strumieniowych w jeden korpus z zasilanym urządzeniem jest ostatnio spotykanym bardzo typowym kierunkiem rozwoju ich budowy. Zawór nie jest wykonywany jako samodzielna jednostka, ale wbudowywany bezpośrednio do urządzenia, w którym przepływający strumień jest sterowany.

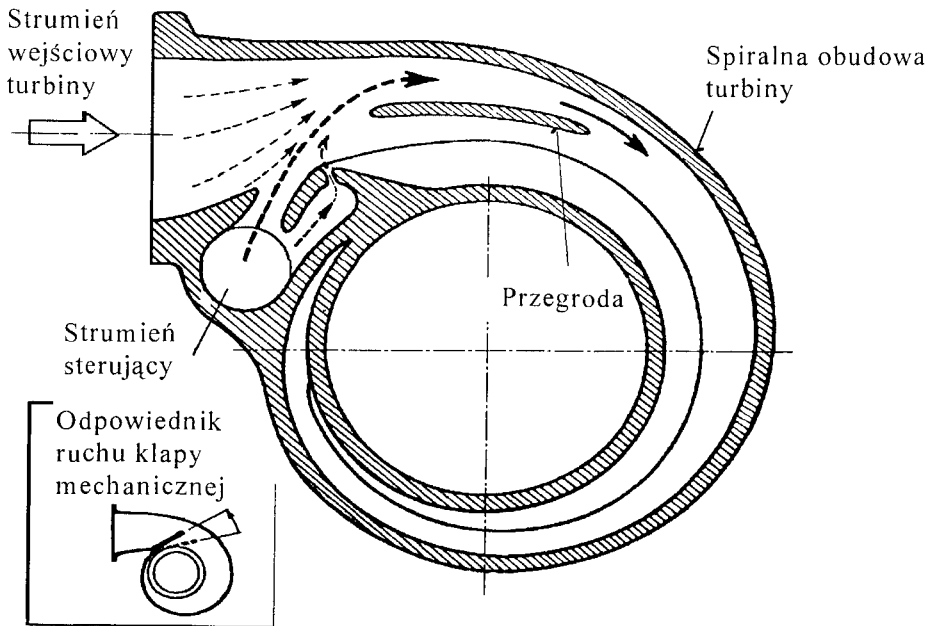


Rys.17. Wykorzystanie zaworu strumieniowego w sterowaniu gazów spalinowych w katalizatorze do silników samochodowych opatentowany przez VOLKSWAGEN A.G. [5]

Typowym przykładem jest integracja zaworu osiowosymetrycznego z wejściową częścią reaktora z wkładką filtracyjną pokazana na rys.17. Osiowosymetryczna wersja zaworu monostabilnego (wejście sterujące wykorzystuje spadek ciśnienia na turbinie) została w tym przypadku zintegrowana z korpusem stosowanego reaktora.

Zalety zwartości porównano w dwóch przykładach z rys.10 i 19. Oczekiwany efekt działania (ograniczenie obszaru dzielonego przenikania strumienia na brzegu turbiny obrotowej) jest w zasadzie taki sam w obydwu przypadkach. Zwarta konstrukcja, jak to pokazano w wersji zintegrowanej na rys.19, zezwala na rzucającą się w oczy, oszczędność przestrzeni. Należy zauważyć, że na rys.10 z oddzielnymi zaworami, gdzie gaz jedynie zwalnia prędkość w dyfuzorach zaworów strumieniowych, jest przyspieszany ponownie w dalszej części strumienia w komorze spiralnej. W postaci zintegrowanej, pokazanej na rys.19, te zmiany prędkości (oraz nieuchronne związane z nimi straty) są wyeliminowane.

Jednym ze sposobów sterowania turbin, np. małych turbin do turbospójzarek, gdzie konstrukcja z odchylanymi łopatkami wirnika nie jest ekonomiczna, jest zwiększenie prędkości napływu na łopatki wirnika, dzięki temu, że płyn jest doprowadzany jedynie na część obwodu. Wykonywane jest to przez zablokowanie części korpusu spiralnego przez mechanicznie obracaną klapę. Jej działanie można zastąpić zaworem strumieniowym, przy czym wpływ do spiralnego korpusu jest rozdzielony na dwie części przez zabudowaną przegrodę (ang. splitter plate), a zawór strumieniowy kieruje płyn jedynie z jednej strony tej przegrody. W konstrukcji przedstawionej na rys.18 zawór jest wykonany jako integralny element układu wlotowego spiralnego korpusu sprężarki, wobec czego nie jest dodatkowym elementem umieszczonym przed korpusem.

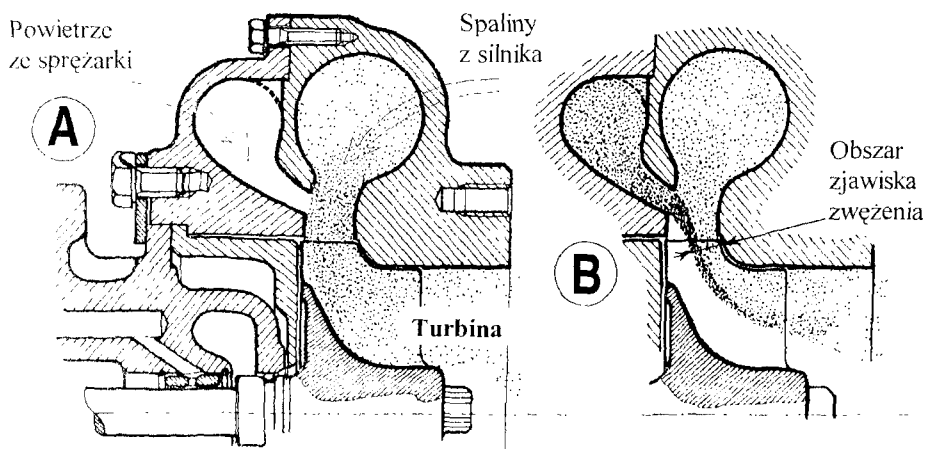


Rys.18. Zawór strumieniowy zastępujący klapę mechaniczną

5. UJEMNE STRONY ZAWORÓW STRUMIENIOWYCH

Jednym z problemów jest fakt, że w porównaniu z raczej prostym działaniem zaworów mechanicznych, stosowanie zaworów strumieniowych znacznie utrudnia projektowanie systemu kompleksowego. Charakterystyki zaworów strumieniowych są często bardzo silnie nieliniowe, muszą one jednak być uwzględniane w obliczeniach. W odróżnieniu od masowo produkowanych standardowych zaworów mechanicznych, które mogą z powodzeniem zostać zastosowane przy wielu różnorodnych obciążeniach, każdy zawór strumieniowy wymaga indywidualnego określenia jego własności (wyrażonych w postaci charakterystyk) w zależności od poszczególnych obciążeń.

Innym poważnym negatywnym czynnikiem są niepomijalne straty energetyczne, które mają miejsce w zaworach strumieniowych. Ażeby wywołać efektywne zjawiska aerodynamiczne, płyn musi zostać dostatecznie przyspieszony w głównej dyszy. Ogólnie mówiąc, straty (zamiana kinetycznej energii strumienia w ciepło) są w przybliżeniu proporcjonalne do kwadratu prędkości - w wyniku tego wzrost prędkości w dyszy powoduje wzrost strat. Dla utrzymania prędkości strumienia na niskim poziomie za komorą interakcyjną zaworu, gdzie ona nie jest dalej potrzebna, typowe zawory strumieniowe są wyposażone w dyfuzory. Należy zwrócić uwagę na fakt, że dyfuzory stanowią istotną część kształtu geometrycznego zaworów. Ten fakt ilustrują rysunki 7, 10, 12 lub 14.



Rys. 19. Zawór strumieniowy zintegrowany z turbiną

Nawet kształt dyfuzora o nieznacznych wymiarach, jakkolwiek bardzo odległego od wzoru o idealnych własnościach, jest przyczyną pewnych nieuniknionych strat w dyfuzorze. Jako praktyczną zasadę określającą użyteczność zaworów strumieniowych można przyjąć stwierdzenie, że współpracują one z obciążeniem optymalnie, jeżeli zawór prezentuje rezystancję przepływu porównywalną z rezystancją obciążenia przyłączonego do jego wyjścia. W energetyce (traktując moc przekształcaną przez przepływający płyn w niektórych maszynach energetycznych jako obciążenie - taką maszyną jest turbina na rys. 9 i 10) jest raczej zjawiskiem niepomysłnym tracić potrzebnej energii.

6. UDANE APLIKACJE

Sterowanie strumienia płynu jest generalnie jednym z najczęściej spotykanych zagadnień technicznych. Zawory strumieniowe mogą znaleźć zastosowanie w wypełnieniu tego zagadnienia w szerokim spektrum aplikacji - brak w nich elementów mechanicznych przynosi niepodważalne zalety. Jakkolwiek nikt nie oczekuje, że zawory strumieniowe mogą pewnego dnia wszędzie zastąpić wszystkie klasyczne zawory mechaniczne, trudno je proponować jako zawory standardowe lub ogólnego użytku, ponieważ jest charakterystyczne, że zawory strumieniowe muszą być pieczołowicie dobierane w zależności od poszczególnych obciążeń oraz sposobu wykorzystania.

Dotychczas najbardziej udane aplikacje znajdują się raczej w specjalnych obszarach techniki, gdzie ich specyficzne zalety mają istotne znaczenie. Typowymi aplikacjami są:

- układy sterowania niebezpiecznych płynów (gorących, toksycznych, radioaktywnych), gdzie wydatnie wykorzystywana jest ich niezawodność, ograniczenie lub brak konserwacji,
- zawory do nuklearnych systemów zabezpieczeń oraz systemy bezpieczeństwa w ogólności, gdzie istotna jest niezależność od wysokiej temperatury i wibracji,
- układy spełniające niskiego kosztu, typowym przykładem zastosowania może być ich wykorzystanie w urządzeniach sterujących gazami wydechowymi samochodów (rys.17). Ten typ jest rozwijany przez pierwszego z autorów z przeznaczeniem dla samochodowych systemów uzdatniania gazów wydechowych,
- układy spełniające niskiej wagi. Istnieje kilka udanych zastosowań dotyczących sterowania strumieni płynów w lotnictwie. Interesującą typową aplikacją (aktualnie badanych przez kilku producentów sprzętu areonautycznego) jest strumieniowa wektoryzacja siły ciągu silników lotniczych [3] (silniki nośnonapędowe - vectoredthrust engine). Strumieniowo sterowane dysze znajdują istotne wykorzystanie w przyszłych super sterowalnych myśliwcach. Jednakże obecnie wektoryzacja jest również poważnie brana pod uwagę w samolotach transportowych, gdzie może istotnie podnieść bezpieczeństwo lotów.

Wydaje się, że interesującym obszarem zastosowań zaworów strumieniowych będą aplikacje wymagające niskich kosztów i długiej żywotności. Do nich należą różnorodne urządzenia domowe, powietrzne i inne kanały płynowe w pomocniczych układach samochodowych, układy klimatyzacji lub systemy wentylacyjne. Obecnie jest jednak jeszcze trudno przewidzieć, w jakim stopniu zawory strumieniowe znajdą tu swoje zastosowanie.

LITERATURA

- [1] Priestman G.H., Tippetts J.R.: Development and Potential of Power Fluidics for Process Flow Control, Chemical Engineering Research and Design, p. 67, Vol. 62 (1984) Nr.2.
- [2] Tesař V.: "Fluidic Load-Switched Valve for Hot Gas Flow Control", Proc. of FLUCOME'94, p. 741, Toulouse, France, Sept. 1994.
- [3] Strykowski P.J., Krothapalli A., Forliti D.J.: "Fluidic Thrust Vectoring of a Supersonic Rectangular Jet using Counterflow", AIAA Journal, 1995.

- [4] Markland E., Tsevdos N.: The Jet Flap Applied to Flow Control, Proc. of FLUCOME '88, 2nd Int. Symp. on Fluid Control, Measurement, Mechanics, and Visualisation. Sheffield, 1988.
- [5] Decker G. et al.: "Vorrichtung zur Behandlung von Abgasen aus Brennkraftmaschinen", German Offenlegungsschrift DE 197 09 432 A1, 1996/1997.
- [6] Woods R.L., Tseng R.J.: "A Fluidic Low Output Impedance Device", Proc. of FLUCOME '85, Tokyo 1985.

SELECTED ASPECTS OF DESIGN AND APPLICATIONS OF FLUIDIC VALVES

Summary

This paper surveys the area of little known new valves without mechanical moving parts, which have recently become increasingly used in several special fluid flow control applications and are under development at ATR Bydgoszcz under a cooperative project of both authors. The basic principles of the operation, the offered advantages, the integrated design, the disadvantages, the classification and successful applications of the fluidic valve are described.

UWARUNKOWANIA ZMIAN PROGRAMOWYCH W PRZEDMIOTACH TECHNICZNYCH

Bogdan Żółtowski

Wydział Mechaniczny ATR
Katedra Maszyn Roboczych i Pojazdów
ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Dostosowywanie treści i programów nauczania do wymogów zmieniającego się rynku pracy winno być szybkie i skuteczne, co warunkuje popularność kierunków i specjalności. W tej pracy wskazano na główne uwarunkowania zmian programowych wynikające z transformacji społeczno-gospodarczej, jaka dokonała się w kraju. Możliwe do wprowadzenia merytoryczne zmiany treści nauczania w zakresie przedmiotów technicznych pokazano na przykładzie diagnostyki technicznej.

Słowa kluczowe: diagnostyka maszyn, zmiany programowe, nowelizacja

WPROWADZENIE

Nowa sytuacja społeczno-gospodarcza w kraju wymaga dostosowywania obowiązujących dotychczas planów i programów studiów do potrzeb aktualnego rynku pracy. Szczególnie dotyczy to zmian w zakresie przedmiotów technicznych, gdyż właśnie przemysł ponosi największe konsekwencje otwarcia się na wolny rynek.

W tej pracy dokonano pobieżnej analizy skutków transformacji polityczno-społecznej w aspekcie konieczności zmian w nauce i nauczaniu. Wyraźnie zauważalne skutki przemian w metodach zarządzania, organizacji i humanizacji życia stanowią bazę dla proponowanych zmian programowych. Ich propozycje zostały jednak ograniczone tylko do zagadnień przedmiotów technicznych, co wiąże się z charakterem i specyfiką pracy autora

W aktualnej sytuacji wydaje się być słuszny postulat podejmowania szerokiej dyskusji wokół problematyki kształcenia, zmian programowych i organizacyjnych, by sprostać potrzebie i wyzwaniom nowych czasów.

Dla zintensyfikowania przemyśleń wokół zagadnień tego opracowania, proponuje się rozważenie skrótu myślowego przedstawionego problemu w następującej postaci:

motto:

*"rozprawiać wiele o wszystkim -
wszystko o jednym"*

1. WYBRANE PROBLEMY NOWEGO SYSTEMU SPOŁECZNO-GOSPODARCZEGO

Nowa sytuacja społeczno-ekonomiczna w kraju uzasadnia potrzebę wnikliwej analizy aktualnej sytuacji i wypracowania kierunków rozwoju w szkolnictwie wyższym w zakresie potrzeb i możliwości kształcenia dla aktualnych, zgoła odmiennych od dotychczasowych, warunków. Nie wnikając głęboko w politykę, każdy przeciętny człowiek wyraźnie zauważa zmiany jakościowe, dające się prosto wyrazić w trzech obszarach:

- w polityce społeczno-ustrojowej,
- w zasadach gospodarowania,
- w nauce.

O ile zmiany w dziedzinie polityki w zasadzie już się dokonały, to w restrukturyzacji gospodarki nadal trwają, a w nauce są dopiero na etapie dyskusji.

By uniknąć posądzeń o niezrozumienie, złą wolę lub nawet dyletanctwo w dyskusowaniu zmian politycznych, w tej pracy nie podejmuję się szczegółowego omawiania tego problemu. Sytuacja ta jest widoczna w życiu codziennym, w mediach i sposób jednoznaczny kształtuje obraz poczynań w kraju. Pewne i nie wymagające komentarza jest stwierdzenie, że zmiany z tego obszaru wywierają istotny wpływ na całokształt działań w pozostałych dziedzinach życia.

W zasadach gospodarowania wyraźnie zaznaczają się zmiany w zakresie:

- przejścia z gospodarki centralnie sterowanej na rynkową (wolnorynkową),
- zmian metod zarządzania i organizacji przemysłu i rolnictwa,
- roli człowieka w rozwoju gospodarki.

Szczegółowe dyskusowanie tych zmian, w aspekcie kształcenia - co jest celem tej pracy, jest tu zbędne, chociaż i trudne. Niemniej warto w tym miejscu przytoczyć kilka oczywistych stwierdzeń:

- 1) uczymy, aby ludzie po szkole otrzymali pracę, a nie jak obecnie by większość szła po zasiłek dla bezrobotnych lub poszukiwała pracy za granicą;
- 2) w gospodarce rynkowej 80% nowych miejsc pracy powstaje w małych przedsiębiorstwach, zatrudniających poniżej 50 pracowników. Taka sytuacja istnieje w krajach, w których ponad 50% dochodu narodowego tworzą małe przedsiębiorstwa, dynamiczne i elastyczne na wymogi i potrzeby zmieniającego się rynku;
- 3) w Polsce nadal około 80% dochodu narodowego powstaje w dużych przedsiębiorstwach, a te podlegają w różnym tempie restrukturyzacji. Polega ona najczęściej na rozbijaniu dużych zakładów na kilka mniejszych i powoduje zwolnienia prawie 30% załogi. W tych warunkach na pewno przez 20 lat duże przedsiębiorstwa nie zaproponują żadnego zatrudnienia młodych. Wyjątkiem będą tu tylko potrzeby uzupełniania potrzeb (zejścia, emerytury, renty, nieuszanowanie pracy) lub nowe zawody (informatycy, elektronicy, ekolodzy i inni);
- 4) pojawienie się paktu o przedsiębiorstwie jest pierwszym uregulowaniem prawnym w nowych warunkach gospodarczych, zapewniającym pewne prawa pracownikom, np. udziały w spółkach. Powodzenie tego przedsięwzięcia zależy od umiejętności, kreatywnego działania ludzi, którego należy ich nauczyć;
- 5) o rozwoju społeczno-gospodarczym kraju dziś decyduje "jakość", a więc przetrwanie i rozwój przedsiębiorstwa.

Czytelne zatem stają się przemiany obserwowane w polityce i gospodarce. A co dzieje się w nauce, gdzie dawny rynek, dla którego szkolimy nadal - restrukturyzuje się i ginie. Jaki zatem jest wpływ tych zmian na programy studiów, plany studiów i działalność placówek dydaktycznych ?

2. KIERUNKI ZMIAN W KSZTAŁCENIU TECHNICZNYM

Rozważana analiza nowych uwarunkowań społeczno-gospodarczych w aspekcie dydaktycznym daje przesłanki do założeń nowego systemu nauczania, precyzującego zupełnie odmienne od dotychczasowych cechy sylwetki absolwenta wyższej uczelni.

Abstrahując w tym miejscu od niedoskonałości systemu edukacji (finansowanie, status, priorytety) ograniczono wywody tej pracy jedynie do zakresu ogólnych spostrzeżeń w kształceniu technicznym. Są to sugestie możliwe do wprowadzenia w życie uczelniane prawie natychmiast, w ramach bezrewolucyjnych, rozsądnych zmian szczegółowych zakresu programów przedmiotowych. W aktualnej samodzielności uczelni takie decyzje mogą być realizowane bez większych przeszkód.

W świetle przedstawionych wymagań rynku pracy, współczesny absolwent winien:

- cechować się kreatywnością działania (twórca oparty na fantazji, a nie obserwacji),
- realizować twórczo i na najwyższym poziomie "jakość" i potrzeby wolnego rynku,
- wyznawać filozofię humanistyczną wg zasady: "bardziej niż maszyny potrzebne nam człowieczeństwo".

Warto w tym miejscu pokusić się chociażby o pobieżną dyskusję sytuacji zastanej i pożądanej, w aspekcie określonych powyżej wymogów.

W systemie gospodarki rynkowej każdy wyrób sam musi się bronić na rynku, a więc winien być dobrym pod względem technicznym, organizacyjnym, ekonomicznym, społecznym i prawnym. Cały proces tworzenia musi w każdym etapie nawiązywać do efektywnego wykonania danej potrzeby społecznej, tylko według relacji: twórca - potrzeba, bez zbędnej nadbudowy i ogniw społecznych.

Znane z przeszłości "centralne sterowanie" polegało głównie na rozbijaniu każdego problemu na wąskie zagadnienia, a uprawnieni łączyli, wytyczali, sterowali - zawsze w uwarunkowaniach politycznych. Nieprzypadkowe było więc wąskie specjalizowanie na zagadnienia techniczne, organizacyjne, humanistyczne itd. Stąd też, znany nam dalej, sztuczny podział w uczelniach na wydziały konstrukcyjne, technologiczne i eksploatacyjne. Czy wymogi współczesnej gospodarki podtrzymają te rozdziały ?

Wydaje się, że trzeba zawrócić do takiej nauki, gdzie wartościowanie, konstruowanie, wytwarzanie i eksploatacja są traktowane systemowo, spełniając potrzeby i oczekiwania. O ile fazy konstruowania, wytwarzania i eksploatacji są jeszcze rozdzielne, ale znane, to faza wartościowanie (szczególnie w technice) jest zupełnie nowym lub lepiej na nowo odkrywanym faktem.

W gospodarce wolnorynkowej największą wagę przykładą się do problemu kosztów, stąd uznane pojęcie "wartościowanie techniki", a więc faza wartościowania w życiu obiektu. Każde przedsięwzięcie techniczne, wymagające środków inwestycyjnych jest koniecznie poprzedzane przez "businss plan", który musi być akceptowalny przez specjalistów w banku. Wymagania takiego planu w znacznym stopniu zakreślają przedsię-

wzięcia, a więc plany, zamierzenia i skutki (czyli spełniania potrzeby) wartościowania. Z drugiej strony dla odbiorcy podstawowe kryterium spełnienia potrzeb, już dziś przyjmuje się, że 85%, stanowią koszty eksploatacji. U nas, brak takiego podejścia wytworzył lukę naukową i psychologiczną. Stąd należy temu etapowi prac w technice nadać najwyższe znaczenie, aby wreszcie przełamać "stare" traktowanie zagadnień technicznych. Znane są literaturowo przykłady śmiałego traktowania tych zagadnień przez niektórych autorów podręczników, jak np.:

- prof. J. Dietrycha, który w swoim dziele: "Projektowanie i konstrukcja" (WNT, 1974) wyraźnie omawia wartościowanie techniki, a wydawnictwo zwalnia wielokodusznie autora z wyjaśnień wątpliwości pisząc - "przedstawiony materiał jest dobrą prowokacją do dyskusji...";
- prof. Z. Osińskiego, w swoich pracach z mechaniki omawia zasady doboru i tworzenia racjonalnej strategii projektowania (czyli wartościowania), lecz bez zasad ekonomiki.

Realizacja treści etapu wartościowania winna znaleźć miejsce w poszerzonym wykładzie z konstrukcji maszyn, a także w nowych, współkreszlających ten etap treściach przedmiotów: logistyka, mikroekonomia, rachunkowość i marketing. Na tej bazie można oceniać "wykonanie potrzeb i spełnianie oczekiwań" odbiorcy, a nie jak dotychczas tylko parametry techniczne urządzeń.

Uznanie roli człowieka w rozwoju techniki, to zmiany w obszarze filozofii życia, szczególnie w świadomości człowieka, które są sprawcze dla zmian w technice i ekonomii. Humanizm jest zjawiskiem światowym, charakteryzującym się przyjmowaniem wolności jako wartości uniwersalnej.

"Człowiek świadomie przekształca świat zgodnie z celami człowieka. Bardziej niż maszyny potrzebne nam człowieczeństwo" - to założenia podstawowe dla wartościowania potrzeb.

Urządzenia przekształcają świat zgodnie z celami człowieka. Stąd na pierwszy plan w nauce o systemach eksploatacji wysuwają się zagadnienia ergologii, ekologii i bezpieczeństwa, które urosły do samodzielnych dyscyplin naukowych. To "strefa prawna", tak dotychczas zaniedbana, która zabezpiecza społeczeństwo przed zgubnym działaniem maszyn na człowieka i środowisko. Nadanie priorytetu tym zagadnieniom, jak też uwzględnienie: inżynierii systemów, diagnostyki, tribologii, niezawodności itd. z punktu widzenia potrzeb przekształcenia świata zgodnie z celami człowieka, wymaga zmiany świadomości przeciętnego inżyniera.

Sprawy ludzkie i międzyludzkie, będące przedmiotem rozważań psychologii ogólnej, prakseologii pracy i socjologii, powinny stanowić podstawę formułowania problemów i kierowania zespołami ludzkimi. Należy potrafić profesjonalnie ocenić stany psychiczne załogi oraz posiadać umiejętności motywowania innych, by sprostać wymogom pracy z zespołami pracowniczymi. Patrząc na problematykę zakresu potrzeb modernizacji kształcenia w zmienionych warunkach gospodarki rynkowej, autor jest przekonany, że myślimy podobnie - lecz cóż udało się nam z powyższego zrobić, jak zreorganizowaliśmy nasze "podwórka" dydaktyczne ?

3. NOWE TREŚCI W DIAGNOSTYCE TECHNICZNEJ

Przyjmując za słuszne przedstawione dotychczas uwagi można wskazać na pewne działania podjęte w kierunku modernizacji treści kształcenia, co pokazano na przykładzie cieszącej się ostatnio dużym zainteresowaniem słuchaczy i przemysłu - diagnostyki technicznej.

3.1. Istota diagnostyki technicznej

Diagnostyka techniczna to zorganizowany zbiór metod i środków do oceny stanu technicznego (jego przyczyn, ewolucji i konsekwencji) obiektów technicznych (maszyn). Stan techniczny obiektu jest definiowany w kategoriach "jakości" i bezpieczeństwa jego działania, poprzez wektor miar bezpośrednich lub pośrednich.

Miary bezpośrednie stanu technicznego obiektów mechanicznych to np.: wymiary geometryczne ich elementów, geometria współpracy par kinematycznych, trajektorie organów roboczych, charakterystyki wyężenia materiału, itp., które określa się jako cechy stanu obiektu. Miary pośrednie stanu technicznego, odzwierciedlające zaawansowanie procesów zużyciowych i jakość funkcjonowania obiektu, noszą nazwę symptomów, czyli wielkości mierzalnych, współzmienniczych z cechami stanu technicznego. Symptomy, jako miary sygnałów (procesów) diagnostycznych, są zorientowane uszkodzeniowo i wyznaczane w oparciu o badanie procesów wyjściowych z funkcjonujących obiektów.

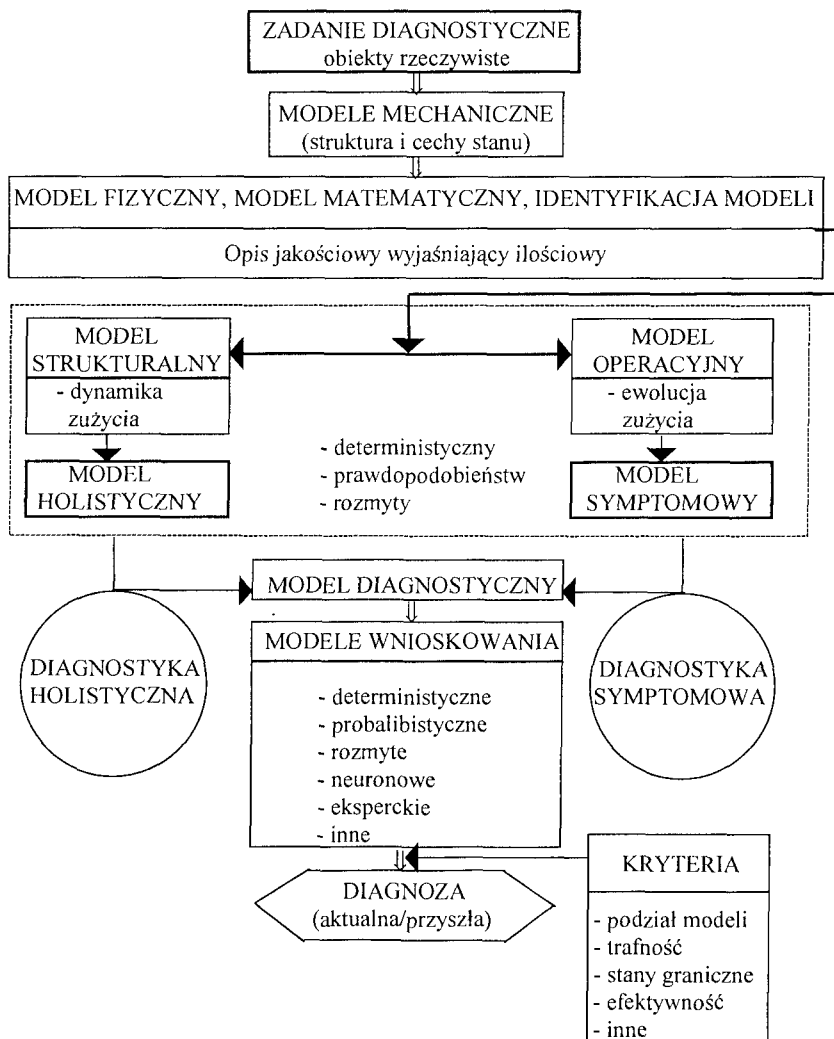
Stan techniczny obiektu można więc określić obserwując funkcjonowanie obiektu, tzn. jego wyjście główne przekształconej energii (lub produktu) oraz wyjście dyssypacyjne, gdzie obserwujemy różnego typu procesy resztkowe (termiczne, wibracyjne, akustyczne, elektromagnetyczne). Obserwacja tych wyjść daje całą gamę możliwości diagnozowania stanu poprzez:

- **obserwacje procesów roboczych**, monitorujących ich parametry w sposób ciągły, czy też prowadzenie badań sprawnościowych maszyn na specjalnych stanowiskach (moc, ciśnienie, prędkość itp);
- **badania jakości wytworów**, zgodności pomiarów, pasowań, połączeń itp., gdyż ogólnie tym lepszy stan techniczny maszyny im lepsza jakość produkcji;
- **obserwację procesów resztkowych**, stanowiących bazę wielu atrakcyjnych metod diagnostycznych, opartych głównie na modelach symptomowych.

Poznanie stanu technicznego obiektu wymaga jednoznacznego skojarzenia cech stanu obiektu ze zbiorem miar i ocen generowanych procesów wyjściowych, czyli symptomów. Algorytmy podporządkowujące sobie oba zbiory cech - konstrukcji i symptomów - są podstawą tworzenia modeli diagnostycznych obiektów.

W zależności od rodzaju cech obiektu odzwierciedlonych w modelu będzie on miał charakter symptomowy lub strukturalny (rys.1). Po stronie opisu symptomowego mamy diagnostykę opartą na symptomach stanu, zaś po stronie strukturalnego opisu analitycznego obiektu mamy diagnostykę wspartą modelowo. W zależności od naszych możliwości kompensacji zakłóceń procesu i otoczenia model ten może być deterministyczny, probabilistyczny lub rozmyty. Dla oceny stanu obiektu oba rodzaje diagnostyki mogą wykorzystywać ten sam bagaż metod wnioskowania, od deterministycznych począwszy a na sztucznej inteligencji kończąc. O ile podejście symptomowe jest faktem dnia codziennego w działaniach diagnostycznych, to modelowanie strukturalne umożliwiające

symulacyjne badanie całego cyklu życia obiektu oraz projektowanie zakresu i systemu diagnozowania staje się możliwością do wykorzystania w przyszłości.



Rys.1. Możliwości modelowania diagnostycznego obiektów

3.2. Treści diagnostyki technicznej

A. Fazy istnienia maszyny

We współczesnym świecie rywalizacja gospodarcza przebiega praktycznie na płaszczyźnie szeroko rozumianej "jakości", z której można uzyskać określone korzyści ekonomiczne. Korzyści te są uprzednio budowane w kolejnych fazach istnienia obiektów i dotyczą właściwie wszystkich aspektów ich istnienia: funkcjonalnego, materiałowego, energetycznego, wydajnościowego, ekologicznego itp.

Każda maszyna przechodzi cztery fazy swego istnienia (rys.2): wartościowanie (C), projektowanie (P), wytwarzanie (W) i eksploatację (E). Coraz większe wymagania stawiane maszynom określiły szereg kryteriów, które są badane w każdym z etapów. Metody i środki dające taką możliwość kontroli "jakości" maszyn - spełniania stawianych kryteriów - są zakresem zainteresowań diagnostyki technicznej.

Pierwszy etap - wartościowanie, zwany od dawna w gospodarce rynkowej, pozwala oceniać zaspokojenie potrzeb i oczekiwań odbiorcy w świetle parametrów technicznych urządzenia. Poczynając zatem od wyróżnienia i identyfikacji potrzeby, poprzez sformułowanie problemu technicznego i poszukiwanie różnych koncepcji rozwiązań, a kończąc na zasadach i taktyce opracowania projektu technicznego - realizujemy wyroby (maszyny) do zaspokojenia określonych potrzeb. Wiarygodność spełniania tych potrzeb określa się na podstawie analizy ryzyka kosztów i korzyści zarówno odbiorcy, jak i wytwórcy. Tę fazę działania określają:

- a) środki techniczne, np.:
 - zbiory elementów, pola możliwych rozwiązań projektowych i konstrukcyjnych,
 - sposoby porównania, skale miar, ważności, kolejności,
 - układy kryteriów, systemy ocenowe,
 - jednoznaczna identyfikacja wielkości mierzonych i środków mierzących;
- b) środki organizacyjno - wytwórcze, których celem jest:
 - uzyskanie i utrzymanie jakości wytworzonego wyrobu usługi, by w sposób trwały zaspokajały potrzeby odbiorcy,
 - potwierdzenie stopnia wiarygodności, że zaplanowany system eksploatacji (w 85% na tym etapie) zapewni w sposób trwały zakładaną jakość,
 - uzyskanie żywotności, kosztów jednostkowych i całkowitych eksploatacji, funkcji degradacji i warunków złomowania i utylizacji.

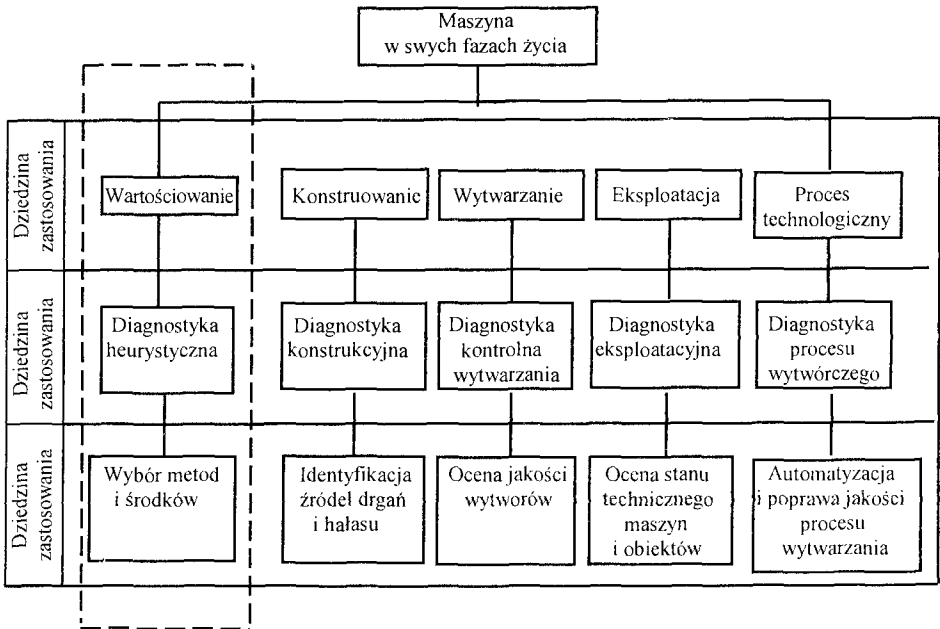
Zawsze te elementy były w umyśle twórcy podstawą decyzji, a poparte dokumentami i rzeczywistym rachunkiem ekonomicznym - wypełniają treść etapu wartościowania.

Etap projektowania (często zwany konstruowaniem) obiektów uwzględnia zasady: funkcjonalności, niezawodności i trwałości, sprawności, technologiczności, ergonomii, efektywności ekonomicznej i ekologii. W tej grupie wymagań najczęściej stosowane są te, które mają charakter uniwersalny, czyli mogą się znaleźć w zestawie dowolnego wyrobu.

Etap wytwarzania pod względem wymogów traktuje jako główne: wysokiej jakości wykonanie, technologiczność operacyjną, dostępność właściwych materiałów, niskie koszty produkcji oraz zgodność z normami (unifikacja, typizacja i normalizacja).

Najwięcej wymagań wiąże się ze sferą eksploatacji wyrobów. Jest to zrozumiałe, gdy za rację bytu obiektu uznamy jego użytkowanie. W tym zakresie można wyróżnić:

- wymagania trwałościowo - niezawodnościowe,
- wymagania związane z efektywnością stosowania wyrobów (sprawność, wydajność, niskie koszty eksploatacji),
- wymagania związane bezpośrednio z użytkowaniem (uniwersalność, łatwość i ograniczenie obsługiwań, podatność odnowy, automatyzacja),
- wymagania związane z oddziaływaniem na otoczenie (cichobieżność, bezpieczeństwo, ergonomia, zanieczyszczenie środowiska).



Rys.2. Fazy istnienia maszyny w ujęciu potrzeb diagnostyki technicznej

Uwzględnienie przedstawionych kryteriów stawianych obiektom w poszczególnych fazach ich istnienia: C - P - W - E daje podstawę oceny spełnienia potrzeb, a także wytycza kierunki rozwoju wiedzy i badań diagnostyki technicznej.

B. Funkcja sterująca diagnostyki

Roła i znaczenie diagnostyki technicznej w każdej z faz istnienia maszyny jest bardzo istotna i ukazana na tle zadań spełnianych przez wytwór w poszczególnych strategiach eksploatacji. Szczególnie istotna jest jednak rola diagnostyki na etapie eksploatacji maszyn, gdzie decyzję o sposobie wykorzystania maszyny podejmuje się w oparciu o wyniki badania stanu technicznego. Na tym tle można już w sposób oczywisty sprecyzować funkcję sterującą diagnostyki, gdzie sposób wykorzystywania informacji do sprawnego działania maszyny odpowiada wymogom teorii sterowania.

W systemach sterowania obok wykorzystywania informacji do sprawnego działania istotne jest także pozyskiwanie, przetwarzanie i gromadzenie informacji. Na proces decyzyjny składa się więc ciąg operacji od momentu zdobycia informacji przez jej gromadzenie i przetwarzanie, aż do momentu wyboru i przekazania ustalonej decyzji do realizacji.

Na podstawie zebranej informacji diagnostycznej z podsystemu diagnostycznego podejmowane są następujące decyzje:

- ocena stanu maszyny w chwili "t" (zdatna, niezdatna),
- uszkodzone elementy, w przypadku niezdatności maszyny,
- rozregulowane elementy, w przypadku niezdatności maszyny,
- przewidywany stan maszyny w chwili $t_p = t + \Delta t$ (prognozowanie),
- czas pracy maszyny do naprawy głównej,
- czas rezerwy do likwidacji maszyny,

– termin następnego diagnozowania maszyny.

Proces postępowania z maszyną jest więc następujący:

- w przypadku maszyny zdatnej; badanie stanu - wykonanie niezbędnie koniecznych zabiegów obsługowych - prognozowanie stanu - ustalenie terminu następnego badania,
- w przypadku maszyny niezdatnej; badanie stanu - ustalenie przyczyn niezdatności (rozregulowanie, uszkodzenie, wykonana praca do naprawy głównej lub likwidacji) - usunięcie uszkodzenia - ocena jakości wykonywanej naprawy - wykonanie niezbędnych czynności obsługowych - prognozowanie - termin kolejnego diagnozowania.

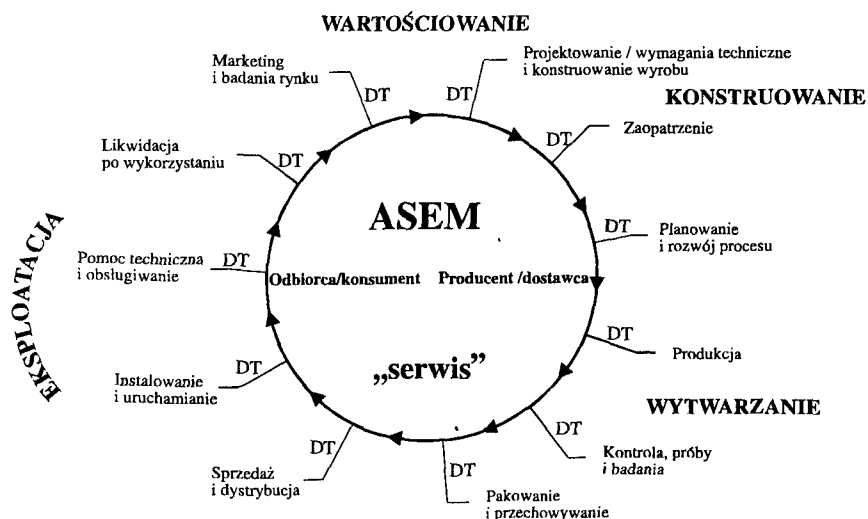
Funkcja sterująca diagnostyki w utrzymaniu zdatności maszyn polega więc na:

- ocenie aktualnego stanu maszyny, określającego możliwości dalszej ich pracy,
- eliminacji niezdatnych, a więc i niebezpiecznych maszyn z użytkowania,
- zapobieganiu uszkodzeniom lub nagłym awariom maszyn, dzięki uprzedzającym badaniom i ocenie stanu,
- przewidywaniu przyszłych stanów maszyn, stwarzając podstawy planowania materiałowo-technicznego i zadaniowego systemu eksploatacji.

Biorąc za podstawę przedstawione możliwości diagnostyki w zakresie nadzorowania zmienności stanów maszyn, zasadne są propozycje metody obsługiwanie maszyn według stanu technicznego w ramach autoryzowanej strategii eksploatacji maszyn.

C. Autoryzowana strategia eksploatacji maszyn

Jakościowe zmiany wymuszone gospodarką rynkową mają rozległe konsekwencje we wszystkich sferach gospodarowania, w tym również w eksploatacji środków trwałych. Wymagania od strony "jakości", marketingu i logistyki zmieniają radykalnie kryteria oceny maszyn, dając przesłanki do dalszego, rosnącego zainteresowania metodami i środkami diagnostyki technicznej.



Rys.3. Autoryzowana strategia eksploatacji maszyn

Proponowana strategia eksploatacji - ASEM - imiennie wskazuje na twórcę i odpowiedzialnego za wyrób. Producent zainteresowany jakością i późniejszym zbytem jest odpowiedzialny za wyrób od zamysłu, poprzez konstrukcję, wytwarzanie i eksploatację, aż do utylizacji po likwidacji obiektu. Tym samym producent konstruuje i wytwarza swoje wyroby w oparciu o najnowsze osiągnięcia myśli technicznej, zabezpiecza swój wytwór własnym serwisem obsługowym w czasie eksploatacji, a także wyposaża obiekty w środki diagnostyczne (najlepiej automatyczne).

Doskonalenie tej przyszłościowej strategii opiera się o nowe, skuteczne metody diagnozowania stanu maszyn, o opracowania pokładowych i stacjonarnych układów diagnostycznych, wspieranych techniką komputerową i dokonaniem sztucznej inteligencji.

D. Organizacyjne i ekonomiczne aspekty diagnostyki

Nowoczesne formy organizacji produkcji umożliwiają uzyskanie wysokiej wydajności produkcji, elastyczności, jakości oraz ekonomicznej efektywności produkcji, pod warunkiem prowadzenia prawidłowej eksploatacji obiektów mechanicznych w przedsiębiorstwie. Realizując w przedsiębiorstwie nowoczesne strategie rozwoju należy właściwie zorganizować gospodarowanie środkami trwałymi, a w nim system utrzymania ruchu maszyn i urządzeń.

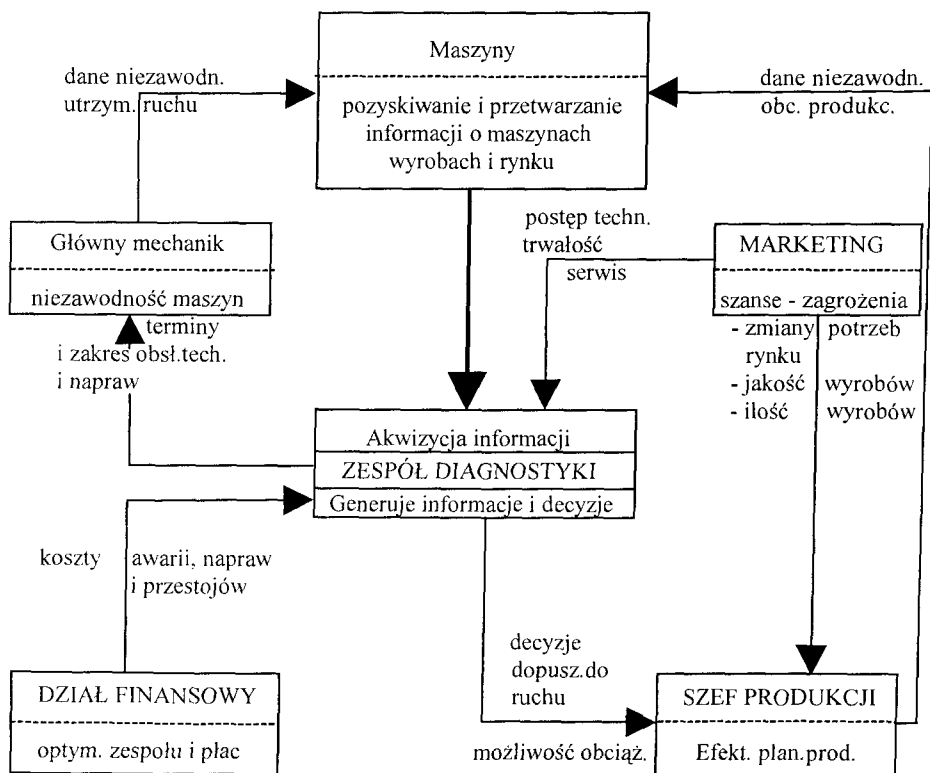
Utrzymanie maszyn i urządzeń w stanie gotowości technicznej polega na zapobieganiu i minimalizacji procesów fizycznego zużywania się ich elementów oraz usuwaniu skutków tego użycia. Informacji o przebiegu tych procesów dostarcza diagnostyka techniczna.

Zakres problemowy projektu organizacyjnego przygotowania wdrożenia diagnostyki w przedsiębiorstwie obejmuje:

- pełną dokumentację techniczną dotyczącą aparatury diagnostycznej, określającą także technologię jej instalacji i eksploatacji (w tym symptomy stanu i instrukcje diagnostyczne),
- system informacji diagnostycznej zawierający źródła, sieć przepływu, odbiorców, sposób wykorzystania, techniczne środki przesyłania i przetwarzania oraz dokumentację,
- technologie obsługiwań, organizację i jednostki odpowiedzialne za zaopatrzenie i gotowość funkcjonalną diagnostyki technicznej,
- zasady doboru i program szkolenia personelu odpowiedzialnego za wykonywanie, nadzór i kontrolę czynności diagnostycznych,
- analizę ekonomicznej efektywności zastosowania diagnostyki w przedsiębiorstwie,
- opracowanie mechanizmów pozytywnej stymulacji ekonomicznej pracowników i jednostek związanych z wykonywaniem zadań diagnostyki.

Problematykę diagnostyki w zakładzie najczęściej powierza się zespołowi diagnostycznemu, który określa zakres, metody i środki niezbędne do nadzoru maszyn (krytycznych, ważnych, mało istotnych). Swoje zadania zespół realizuje w powiązaniu z działem głównego mechanika, szefa produkcji, kierownikiem działu marketingu i księgowością (rys.4).

Zróżnicowaną informacją o stanie maszyn zainteresowane są poszczególne działy zakładu, zależnie od zakresu użytkowania maszyn i specyfiki produkcji.



Rys.4. Powiązania informacyjne zespołu diagnostyki w zakładzie

Zespół diagnostyki pozyskuje i przetwarza informacje o maszynach i na tej podstawie podejmuje odpowiednie decyzje. Decyzje o dopuszczeniu do ruchu danej maszyny oraz informacje o możliwości obciążenia maszyny, a także o konieczności wyłączenia maszyny z ruchu przekazywane są do szefa produkcji. Do głównego mechanika zakładu przekazywane są informacje o terminie i zakresie spodziewanych napraw, a od niego otrzymuje dane niezawodnościowe w celu lepszego zorientowania swych prac. Dla optymalizacji zakresu prac i potwierdzenia swej przydatności zespół otrzymuje informacje o potrzebach rynku z działu marketingu, zaś o kosztach napraw i przestojów - z działu finansowego.

Prowadząc rachunek efektywności ekonomicznej należy uwzględnić:

- koszty przedsięwzięcia diagnostycznego,
- efekty wynikłe z zastosowania diagnostyki,
- zbiór nakładów, kosztów i strat z tytułu funkcjonowania diagnostyki,
- okres obliczeniowy oraz rozkład wymienionych wyżej wielkości w czasie.

Identyfikacja efektów stosowania diagnostyki może obejmować:

- zmniejszenie ilości, częstotliwości i zasięgu awarii maszyn;
- obniżkę kosztów napraw awaryjnych,
- wydłużenie cykli naprawczych, zmniejszenie zakresu i czasu trwania prac obsługowo-naprawczych,

- zmniejszenie strat i poprawę jakości produkcji,
- wzrost wydajności maszyn,
- zmniejszenie ilości wypadków i wzrost bezpieczeństwa pracy.

Nakłady związane z przygotowaniem, wdrożeniem i bieżącą obsługą działalności diagnostycznej przedsiębiorstwa obejmują:

- przygotowanie dokumentacji technicznej i organizacyjnej przedsięwzięcia diagnostycznego,
- zakup lub wytworzenie aparatury diagnostycznej oraz środków przesłania przetwarzania informacji diagnostycznych;
- przygotowanie przedsiębiorstwa i wdrożenie przedsięwzięcia diagnostycznego,
- bieżącą działalność i obsługę diagnostyczną (wynagrodzenia, materiały, energię).

Dokonanie rachunku wymaga wnikliwej analizy dokumentacji i ewidencji zdarzeń w przedsiębiorstwie. Jest to dokumentacja techniczna i ekonomiczna, źródłowa i wtórna, planistyczna i sprawozdawcza. Szczególne miejsce w dostarczaniu informacji ekonomicznej zajmuje służba rachunkowości, prowadząca ewidencję i sprawozdawczość w zakresie kosztów przedsiębiorstwa.

E. Zakres merytoryczny diagnostyki technicznej

Patrząc syntetycznie na ogół możliwych zastosowań diagnostyki w każdej z faz istnienia obiektu, można wyróżnić dziedziny i zakres wiedzy niezbędnej do prawidłowego rozwoju tej dziedziny. Są to: wiedza o obiektach, ich modelowaniu, identyfikacji, symulacji zachowań, nauka o sygnałach i symptomach, teoria eksperymentu, teoria decyzji oraz komputerowe wspomaganie badań diagnostycznych.

Z praktycznego punktu widzenia główne problemy diagnostyki, warunkujące racjonalny rozwój i praktyczne jej zastosowanie, obejmują:

- fizykochemiczne podstawy diagnostyki technicznej (tworzywo konstrukcyjne, warstwę wierzchnią, smarowanie, stany graniczne),
- metodologiczne podstawy badań diagnostycznych, zadania (zadania diagnostyczne, modele diagnostyczne, identyfikację modeli, symulację, wrażliwość miar, techniki wnioskowania, sposoby prezentacji diagnoz),
- komputerową obsługę zadań diagnostycznych (oprogramowanie, planowanie eksperymentów, badania, przetwarzanie sygnałów, estymacja charakterystyk, redukcję wymiarowości, estymację modeli),
- techniczne metody kontroli stanu obiektu (metodyki, metod środków - od najprostszych do systemów doradczych),
- rolę i miejsce diagnostyki w cyklu istnienia obiektu (projektowanie układów diagnostyki, projektowanie diagnostyczne, określanie charakterystyk użytkowych, wartości graniczne, sterowanie eksploatacją),
- przesłanki ekonomiczne stosowania diagnostyki, (mierniki wartości, modele decyzyjne, wskaźniki efektywności, rachunek optymalizacyjny),
- kształcenie dla potrzeb diagnostyki, (zawód, sylwetkę, poziomy kształcenia, doskonalenie, materiały dydaktyczne).

Są to więc grupy podstawowych problemów z różnych dyscyplin podstawowych i stosowanych, zawierające w sobie wyróżniki odrębności naukowej diagnostyki technicznej.

4. PODSUMOWANIE

Uwzględnienie wszystkich możliwych, merytorycznie zasadnych potrzeb w zakresie kształcenia według nowych wymagań gospodarki rynkowej jest zadaniem trudnym i odpowiedzialnym. Tylko ewolucyjne zmiany przemyślanych sposobów realizacji tego zadania spełniają oczekiwania zainteresowanych, nauki i przemysłu.

W naukach technicznych już pobieżne rozpoznanie problemu wykazuje potrzebę poszerzenia treści programowych o zagadnienia: wartościowania, marketingu, logistyki, ekologii, ergologii, psychologii, prakseologii pracy, mikroekonomiki przedsiębiorstw, inżynierii systemów, tribologii, niezawodności, diagnostyki technicznej itd. Można to czynić w ramach wprowadzania nowych przedmiotów, co wydaje się być trudne, lub poprzez umiejętne rozszerzenie zakresu materiału istniejących przedmiotów, co pokazano na przykładzie zmian treści nauczania w diagnostyce technicznej.

Właściwym rozwiązaniem jest taka sytuacja, by problemem dostosowania treści programowych do zmienionej sytuacji społeczno-gospodarczej zajęły się profesjonalnie ośrodki dydaktyczne.

LITERATURA

- [1] Żółtowski B.: Uwarunkowania zmian programowych. ref. zam. w ZD KBN OAN Warszawa, (maj 1994), Mat. niepublikowany.
- [2] Żółtowski B.: Stan obecny i perspektywy rozwoju diagnostyki technicznej. Problemy eksploatacji. 6/93, Radom-Kozubnik 1993.
- [3] Żółtowski B., ii.: Diagnostyka techniczna pojazdów. ATR, Bydgoszcz 1994.
- [4] Żółtowski B., ii.: Badania silników spalinowych. ATR, Bydgoszcz 1995.

CONDITIONED BY CHANGE OF PROGRAM IN TECHNICAL SUBJECT

Summary

Adaptation of contents and educational programs to requirements of developing job market has to be quick and efficacions to lift popularity of courses and specialities.

In this paper the main conditions of programmatic changes as results of social and economical transformation in our country are schown. Possible to introduce changes of essential diadactical contents in mancr of technical subjects were shawn and exemplified by technical diagnostics.

