



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

ZESZYTY NAUKOWE NR 240

MECHANIKA 52

WYDZIAŁ
MECHANICZNY

BYDGOSZCZ – 2002





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

ZESZYTY NAUKOWE NR 240

MECHANIKA

52

BYDGOSZCZ – 2002

REDAKTOR NACZELNY
dr hab. inż. Janusz Prusiński, prof. nadzw. ATR

REDAKTOR DZIAŁOWY
prof. dr hab. inż. Maciej Woropay

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Dorota Ślachciak, Ewa Olawińska

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej
Bydgoszcz 2002

ISSN 0208-6395

Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. (052) 3749482, 3749426
e-mail: wydawucz@atr.bydgoszcz.pl <http://www.atr.bydgoszcz.pl/~wyd>

Wyd. I. Nakład 150 egz. Ark. aut. 8,05. Ark. druk. 10,50. Papier druk. kl. III.
Oddano do druku i druk ukończono w sierpniu 2002 r.
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii ATR Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20

2002 8 15

Spis treści

| | |
|--|-----|
| 1. Artur Cichański, Aleksander Światała - Przegląd doświadczalnych metod badania dwuosowego zmęczenia | 5 |
| 2. Edmund Dulcet, Sylwester Borowski - Próba opracowania techniki aplikacji preparatu konserwującego do wilgotnego siana w czasie jego zbioru prasą zwijającą; wstępna ocena jakości uzyskanego siana..... | 17 |
| 3. Józef Flizikowski - Konstrukcyjne przetwarzanie żywności | 27 |
| 4. Zdzisław Jaskulski - Identyfikacja struktury systemu dla potrzeb zarządzania eksploatacją..... | 35 |
| 5. Hubert Latoś, Tadeusz Leppert - Wpływ promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej na chropowatość powierzchni przy skośnym skrawaniu | 45 |
| 6. Tadeusz Leppert - Analiza potencjału i pozycji strategicznej elastycznych systemów produkcyjnych | 55 |
| 7. Jan Łukasiewicz, Marek Szymczak - Wyznaczanie współczynnika przewodzenia ciepła w warunkach laboratoryjnych..... | 65 |
| 8. Eugeniusz Ranatowski - Teoretyczne podstawy wymiarowania materiałów i konstrukcji z wykorzystaniem mechaniki pękania..... | 75 |
| 9. Eugeniusz Ranatowski - Praktyczne aspekty wymiarowania materiałów i konstrukcji z wykorzystaniem mechaniki pękania..... | 91 |
| 10. Marian Szymański, Jan Łukasiewicz, Marek Szymczak - Ograniczanie strat ciepła w transporcie energii..... | 101 |
| 11. Marian Szymański - Wentylacja hali maszyny papierniczej..... | 113 |
| 12. Marian Szymański - Aspekty energetyczne i technologiczne recyklingu makulatury | 123 |
| 13. Aleksander Światała, Dariusz Skibicki - Metoda badań zmęczeniowych w warunkach złożonego stanu naprężenia z wykorzystaniem płaskich próbek romboidalnych | 131 |
| 14. Sylwester Wawrzyniak - Wpływ częstotliwości sygnału sterującego na parametry wpływu strumienia powietrza z dyszy osiowosymetrycznej..... | 137 |
| 15. Janusz Zachwieja - Drgania walca prowadzącego krajarki papieru KL63 | 145 |
| 16. Bogdan Żółtowski - Modelowanie w identyfikacji stanu dynamicznego silnika turbinowego..... | 155 |

PRZEGLĄD DOŚWIADCZALNYCH METOD BADANIA DWUOSIOWEGO ZMĘCZENIA

Artur Cichański, Aleksander Światała

Katedra Sterowania i Konstrukcji
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pracy przedstawiono przegląd doświadczalnych metod badania dwuosiowego zmęczenia pod kątem kształtowania próbki. Wskazano grupę metod uznawanych za standardowe, natomiast szerzej omówiono niestandardowe metody badania dwuosiowego zmęczenia.

Słowa kluczowe: dwuosiowe zmęczenie, metody doświadczalne

1. WSTĘP

W procesie poznawania zjawisk zmęczeniowych badania doświadczalne odgrywają bardzo ważną rolę. Do badania fenomenu zmęczenia szeroko wykorzystywane są obciążenia jednoosiowe. Szerokie zestawienie wyników tych badań oraz podstawy obliczeń zmęczeniowych zawarto w pracy [6]. Ze względu na złożoność rozważanych zjawisk wykształciły się odrębne metody opisu i badania dwuosiowego zmęczenia.

W zakresie metod badania jednoosiowego zmęczenia występuje daleko idąca normalizacja. Jest nią objęty zarówno proces pobierania, jak i przygotowania próbek [10]. Stosowne akty normatywne opisują sposób prowadzenia takich badań w warunkach cyklicznego zginania [11] i osiowego rozciągania-ściskania w warunkach stałego cyklu obciążeń zewnętrznych [12]. Przepisy normalizacyjne są do tego stopnia rozpowszechnione, że często zamiast podawania cech geometrycznych próbek wskazuje się, według jakich zaleceń zostały wykonane [14].

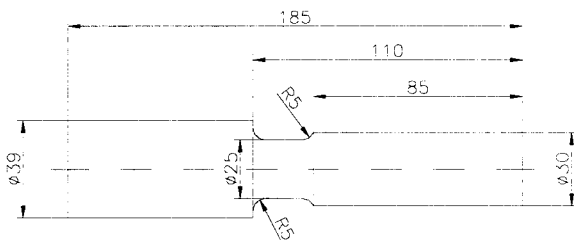
Brakuje natomiast przepisów normalizacyjnych dotyczących badań zmęczenia wieloosiowego. Główną przyczyną tego stanu rzeczy jest konieczność odwzorowania różnych warunków panujących w elementach konstrukcyjnych, np. przy zginaniu obrotowym wału czy obciążeniu ścianki zbiornika ciśnieniowego. Ponadto w warunkach cyklicznych obciążeń złożonych występują dodatkowe efekty nie obserwowane w warunkach cyklicznych obciążeń prostych (np. obrót osi głównych stanu naprężenia).

Prezentowany przegląd metod badawczych przeprowadzony został pod kątem kształtowania próbki. Każdorazowo analizowano również sposób obciążania próbki. Na potrzeby artykułu przyjęto, że metody powszechnie stosowane określane będą mianem metod standardowych. Przez analogię, metody rzadko stosowane, określane będą mianem niestandardowych.

2. STANDARDOWE METODY BADANIA DWUOSIOWEGO ZMĘCZENIA

2.1. Badania z użyciem próbek walcowych

Pierwszą grupą metod stosowanych podczas badań wieloosiowego zmęczenia są metody wykorzystujące walcowe próbki pełne (rys. 1). Próbki o tej postaci najczęściej poddaje się cyklicznym obciążeniom siłą osiową i momentem skręcającym [15]. Stosuje się również obciążanie momentem gnącym i jednocześnie działającym momentem skręcającym [16]. Obciążenia te odpowiadają warunkom pracy, w jakich eksploatowane są wały.

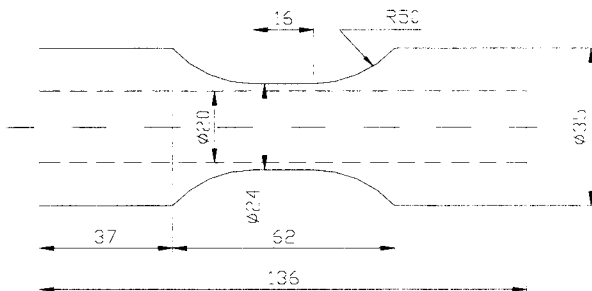


Rys.1. Próbka walcowa [15]

Płaski stan naprężenia, uzyskany na powierzchni części roboczej walcowej próbki pełnej obciążonej momentem skręcającym i siłą osiową, charakteryzuje się stałą wartością amplitud naprężeń stycznych i normalnych. W przypadku obciążenia próbki momentem skręcającym i momentem gnącym występuje dodatkowo gradient naprężeń pochodzących od zginania.

2.2. Badania z użyciem próbek rurkowych

W grupie standardowych metod badania dwuosiowego zmęczenia najczęściej wykorzystywane są metody zakładające użycie cienkościennej próbki rurkowej (rys. 2). Próbki o tej postaci poddaje się cyklicznie zmiennym obciążeniom siłą osiową i momentem skręcającym [7] lub siłą osiową i ciśnieniem wewnętrznym [4].

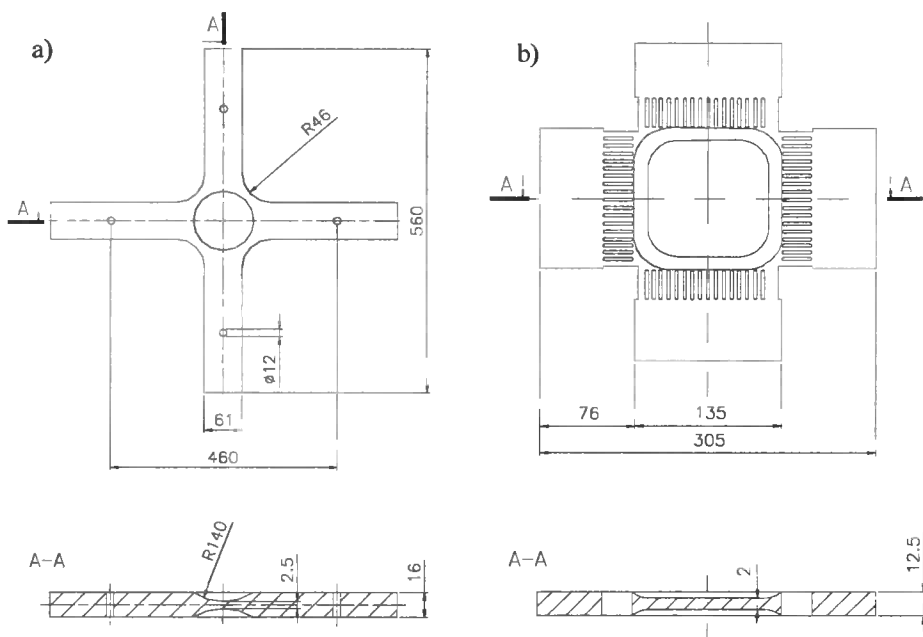


Rys. 2. Rurkowa próbka cienkościenna [7]

Stan naprężenia panujący w części roboczej próbki poddanej obciążeniu siłą osiową i momentem skręcającym jest jednorodny. Na grubość ścianki (najczęściej ≤ 2 mm) mają wpływ zarówno względy technologiczne, jak i konieczność zapewnienia stateczności próbki w półcyklu ściskania. W celu obniżenia niewielkiego gradientu naprężeń w przekroju poprzecznym próbki obciążonej siłą osiową i ciśnieniem wewnętrznym dla próbek tych przyjmuje się grubości ścianki $\leq 0,7$ mm.

2.3. Badania z użyciem próbek krzyżowych

Mniej powszechnie w badaniach dwuosowego zmęczenia stosuje się metody wykorzystujące próbki krzyżowe (rys. 3). Próbki takie obciąża się siłami normalnymi działającymi w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach [1, 2].



Rys. 3. Przykłady próbek krzyżowych: a) za pracą [2], b) za pracą [1]

Jednym z głównych problemów kształtowania próbek krzyżowych (rys. 3a) jest wzajemne oddziaływanie na siebie obciążeń działających w obu kierunkach. Jednym ze spotykanych rozwiązań mających na celu wyeliminowanie tego efektu jest zastosowanie rowków odciążających (rys. 3b). Innym problemem związanym z użyciem próbek krzyżowych jest wyznaczenie naprężeń wywołanych w części roboczej próbki obciążeniem przyłożonym do jej ramion. W zakresie sprężystym pomocna jest analiza MES. W zakresie zmian plastycznych zastosowanie MES jest ograniczone. Pewnym rozwiązaniem jest doświadczalne wyznaczenie odkształceń w części centralnej, przy pominięciu wpływu promienia zaokrąglenia narożnika między ramionami. Ze względu na znaczną ilość czynników oraz możliwość występowania interakcji między nimi, do-

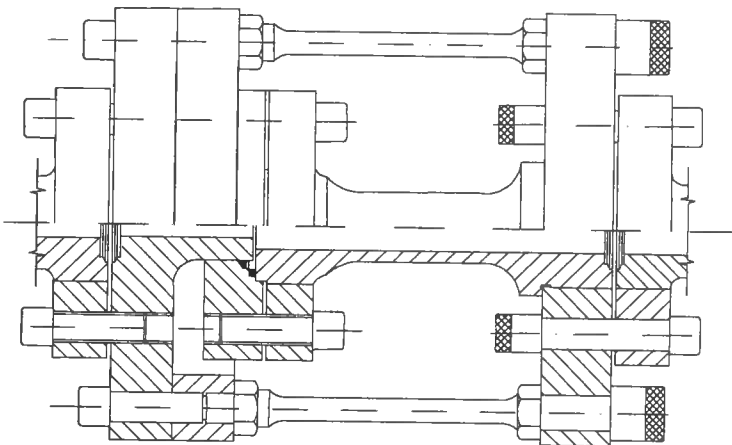
świadczalne ustalenie optymalnej postaci geometrycznej jest bardzo trudne, co tłumaczy częściowo dużą różnorodność geometrii takich próbek.

3. NIESTANDARDOWE METODY BADANIA DWUOSIOWEGO ZMĘCZENIA

3.1. Badania z użyciem grubościennych próbek rurkowych

Pośród metod uznawanych za niestandardowe dużą grupę badań stanowią doświadczenia przeprowadzone na rurkowych próbkach grubościennych. Próbkę takie poddaje się obciążeniu zmiennym ciśnieniem wewnętrznym [9] lub zmiennym ciśnieniem wewnętrznym i siłą osiową [3]. Konstrukcję stanowiska do badań na rurkowych próbkach grubościennych w części mechanicznej, jak i hydraulicznej, a także układ pomiarowy opisano szczegółowo w pracy [9]. Autorzy tej pracy omówili również główne problemy, jakie napotkali podczas wdrażania nowej metodyki i sposoby ich rozwiązania. Jednym z ważniejszych zagadnień podczas kształtowania próbki grubościennej jest zapewnienie jej osiowej symetrii. W celu spełnienia tego wymagania jako ostatnią operację technologiczną wykonuje się toczenie powierzchni zewnętrznej próbki, przyjmując za bazę otwór po operacji honowania.

Badania, których celem było doświadczalne wyznaczenie wpływu trójosiowego rozciągania na wytrzymałość zmęczeniową przy ścinaniu, opisano w pracy [9]. W ściankach grubościennego zamkniętego cylindra obciążonego ciśnieniem wewnętrznym powstaje trójosiowy stan naprężenia. Analiza wzorów Lamego prowadzi do wniosku, że ściskające naprężenia promieniowe i rozciągające obwodowe osiągają wartości ekstremalne na wewnętrznej średnicy cylindra. Tak zidentyfikowany stan naprężenia potraktowano jako superpozycję jednorodnego stanu trójosiowego rozciągania i niejednorodnego stanu ścinania naprężeniami przyjmującymi wartości maksymalne na średnicy wewnętrznej cylindra i wartości minimalne na średnicy zewnętrznej.



Rys. 4. Grubościenne próbki rurkowe w przyrządzie do wytwarzania ciśnienia wewnętrznego i osiowego ściskania [3]

Na grubościennych próbkach rurkowych badano również wpływ naprężenia σ_2 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) na wytrzymałość zmęczeniową w trzyosiowym stanie naprężenia [3]. Próbki poddawano jednostronnie zmiennym cyklom ciśnienia wewnętrznego i siły osiowej. Podczas badań opisanych w pracy [3] użyto 25 próbek o jednakowych nominalnych wymiarach geometrycznych, podzielonych na pięć serii. Ze względu na fakt, że wszystkie próby wykonywano przy tej samej wartości amplitudy ciśnienia, nie było konieczne zabezpieczanie powierzchni przed różnymi skutkami działania oleju. Wartość naprężeń σ_2 kontrolowano poprzez zmianę obciążenia osiowego. W celu wytworzenia siły osiowej, o odpowiednim zwrocie, skonstruowano dwa rodzaje przyrządów używanych zależnie od tego czy próbka miała być rozciągana czy ściskana. Na rysunku 4 przedstawiono grubościenną próbkę rurkową w przyrządzie do wytwarzania ciśnienia wewnętrznego i osiowego ściskania. W przyrządzie tym osiową siłę uzyskiwano z przyłożenia ciśnienia na końcu próbki bezpośrednio do powierzchni czołowej. Dla wszystkich serii otrzymano podobne w sensie statystycznym trwałości. Głównym wnioskiem z badań było stwierdzenie, że dla przyjętej stali i rozważanych warunków badań naprężenie σ_2 nie wpływa na wytrzymałość zmęczeniową w trzyosiowym stanie naprężenia.

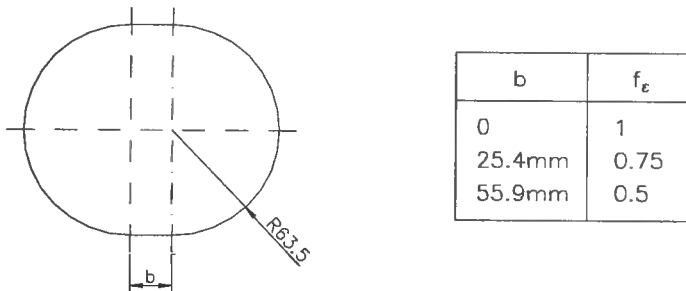
Podczas badań [8] kontrolowano proporcje naprężeń stycznych do normalnych za pomocą zmiany średnicy zewnętrznej próbki. Badania przeprowadzono w sześciu grupach próbek o równej długości pomiarowej 76,2 mm i średnicy wewnętrznej 15,2 mm, różniących się stosunkiem średnicy zewnętrznej do wewnętrznej zmieniającym się w zakresie od 1,2 do 3. Naprężenia rozciągające zmieniły wartości od 32,8 MPa do 200 MPa. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że granica zmęczenia przy ścinaniu jest niezależna od wartości naprężeń rozciągających. Na etapie przygotowywania badań stwierdzono, że na trwałość zmęczeniową duży wpływ ma stan powierzchni próbki stykającej się z olejem. W występujące na powierzchni otworu mikroszczeliny dostawał się olej, powodując obniżenie trwałości próbki. Problem ten rozwiązano pokrywając wewnętrzną powierzchnię próbki warstwą gumy.

3.2. Badania z użyciem płaskich próbek owalnych

W pracy [14] przedstawiono metodę pozwalającą na modelowanie dwuosiowego stanu obciążeń zmęczeniowych w taki sposób, że uzyskany stan naprężenia jest równoważny stanowi powstającemu w ściankach walczaka obciążonego ciśnieniem. Metodyka ta zakładała przeprowadzenie badań na próbkach w postaci owalnych płyt. Na potrzeby badań użyto próbek wykonanych ze stopu aluminium w postaci blach o trzech proporcjach wymiarowych realizujących proporcje odkształceń głównych $f_\epsilon = \epsilon_2 : \epsilon_1$, równe 1, 0,75 i 0,5. Wymiary próbek i realizowane przez nie stosunki odkształceń głównych przedstawiono na rysunku 5. Dla $b = 0$ płyta przyjmuje kształt koła.

Podczas badań próbki były swobodnie podparte na obwodzie. Dwuosiowy stan naprężeń zmiennych osiągnięto poprzez przyłożenie do powierzchni płyt wahadłowo zmiennego ciśnienia. Maksymalna, zmierzona wartość ciśnienia nie ulegała zmianie dla każdej połówki cyklu aż do kilku cykli przed pęknięciem. Ze względu na specyfikę sposobu obciążenia (ciśnienie przykładane do powierzchni próbki), w czasie trwania próby nie było możliwości obserwacji momentu inicjacji i rozwoju pęknięcia. W tym celu próbę przerywano po każdych 10 % oczekiwanej trwałości i próbkę zwalniano z uchwytu celem kontroli powierzchni. Odkształcenia płyty zostały wyznaczone doświadczalnie, dla wszystkich trzech proporcji wymiarowych, za pomocą 10 odpowiednio rozmieszczonych

na niej tensometrów. Wyznaczone wartości odkształcenia posłużyły do kalibracji ugięcia płyty pod obciążeniem. Ugięcie to było wielkością kontrolowaną podczas badań.

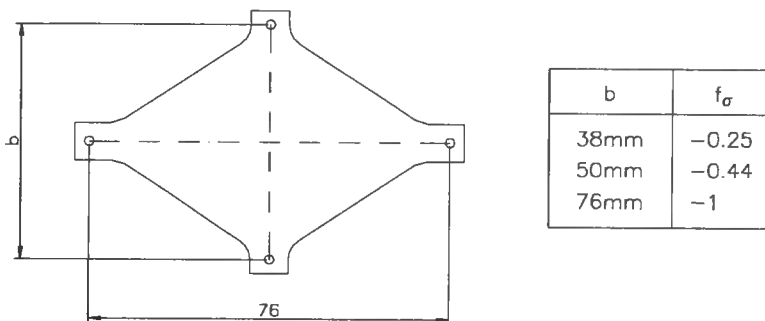


Rys. 5. Płaska próbka owalna [17]

Podczas badań przeanalizowano, jaki wpływ na wytrzymałość zmęczeniową ma, wynikająca z procesu technologicznego, anizotropia własności plastycznych materiału. Doświadczenia prowadzono na próbkach tak wycinanych z blachy, że jedna z osi głównych stanu odkształcenia była nachylona pod kątem 0°, 45° i 90° względem kierunku walcowania. Uzyskane wyniki porównywano z wynikami wyznaczonymi dla tego samego kąta w warunkach jednoosiowej próby zginania. Jako wielkość porównawczą dla obu prób przyjęto odkształcenia oktaedryczne.

3.3. Badania z użyciem płaskich próbek romboidalnych

W pracy [18] przedstawiono metodykę badań wykorzystujących romboidalne próbki płytowe. Badania przeprowadzono na trzech typach próbek. Postacie geometryczne próbek i odpowiadające im wartości $f_{\sigma} = \sigma_2 : \sigma_1$ przedstawiono na rysunku 6. Na potrzeby badań użyto stopu tytanu w postaci odkuwek o grubości 5 mm.



Rys. 6. Płaska próbka romboidalna [18]

Obciążenie próbki wynikało z kontrolowanego przemieszczenia ruchomego uchwytu zamontowanego wzdłuż jednej przekątnej względem nieruchomego uchwytu zamontowanego wzdłuż drugiej przekątnej próbki.

Unikalną cechą próbek romboidalnych jest jednorodny rozkład odkształceń i naprężeń w szerokim obszarze powierzchni próbki. Próbkę romboidalną można potraktować jako złożenie dwóch belek o jednakowej wytrzymałości na zginanie. Osie takich belek pokrywają się z przekątnymi próbki. Stanowi to zaletę tych próbek w porównaniu z płytowymi próbkami owalnymi, w których tylko ograniczony obszar w centralnej części próbki podlega maksymalnym odkształceniom i naprężeniom. Z faktu jednorodnego rozkładu odkształceń i naprężeń na powierzchni próbki wynika łatwość ich kontroli również wtedy, gdy wraz z cykliczną zmianą własności materiału zmienia się stosunek odkształceń do naprężeń. Wyznaczony podczas kalibrowania związek odkształceń i ugięć płyty obowiązuje tak długo, jak długo słuszne jest założenie o liniowym rozkładzie odkształceń na grubości próbki. Dzięki temu jedyną wielkością kontrolowaną podczas próby, oprócz zliczania liczby cykli, jest łatwo mierzalne ugięcie płyty. Słuszność tej metody została potwierdzona doświadczalnie, gdy osiągnięto podobne trwałości zarówno w warunkach kontrolowanej siły, jak i kontrolowanego ugięcia, o wartości wyznaczonej z krzywej kalibracji dla zadanej siły. Sposób obciążania próbki romboidalnej zakładający przyłożenie siły pozwala na wykrycie i obserwację inicjacji i wzrostu pęknięcia zmęczeniowego na powierzchni próbki.

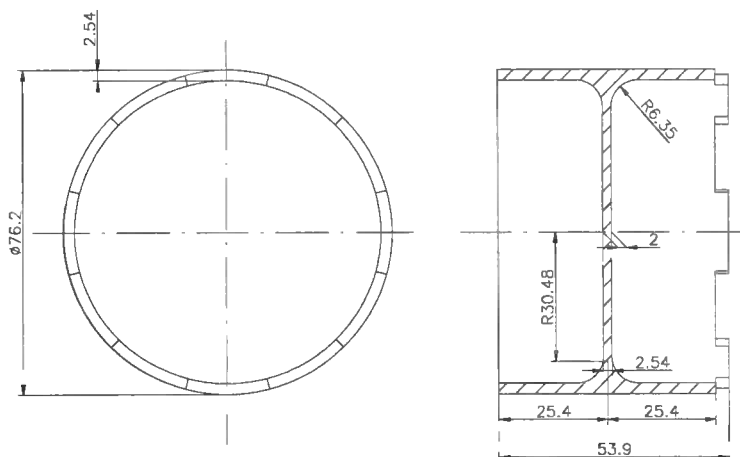
W toku badań na obu powierzchniach próbki wyznaczono rozkład odkształceń za pomocą pomiarów tensometrycznych. Na środku próbki naklejono trójelementową rozetę tensometryczną, zaś wzdłuż osi głównych naklejono pojedyncze tensometry. Analiza wyników pomiarów pozwoliła na stwierdzenie występowania liniowej zależności odkształcenia od obciążenia oraz właściwego zginaniu symetrycznego rozkładu odkształceń przeciwnych powierzchni próbki.

3.4. Badania z użyciem próbek w postaci dysku obrotowego

W pracy [5] autorzy postawili sobie za cel przeprowadzenie doświadczalnych badań zmęczeniowych w taki sposób, aby energia odkształcenia w obszarze krytycznym próbki pozostawała niezmienną w ciągu trwania próby, natomiast osie główne stanu naprężenia zmieniały kierunek względem próbki. Aby zrealizować tak nakreślony cel, zaproponowano próbkę w postaci dysku obrotowego o zmiennej grubości i szerokim kołnierzu, wykonaną ze stopu aluminium 335-T61 - rysunek 7.

W tym przypadku jednoosiowe obciążenie zostało przyłożone do próbki promieniowo poprzez ściskanie rolkami kołnierza na jej obwodzie. Efekt cyklicznej zmiany naprężeń uzyskano poprzez obrót próbki względem nieruchomego punktu przyłożenia obciążenia o stałej wartości. W celu wyznaczenia wielkości obszaru próbki, w którym energia odkształcenia jest stała, wykonano analizy tensometryczne i elastooptyczne.

Badania zasadnicze przeprowadzono na próbkach obracających się z prędkością ok. 3500 obr./min dla sześciu różnych poziomów obciążenia. Podczas badań nie dokonano pomiaru naprężeń w obracającym się dysku. Również cykle nie były liczone precyzyjnie. Najistotniejsze było, czy wystąpi pęknięcie zmęczeniowe. Z faktu wystąpienia takiego pęknięcia autorzy wyciągnęli wniosek, że energia odkształcenia nie może służyć do opisu mechanizmów zmęczenia w warunkach obciążeń wieloosiowych. Uszkodzenie zmęczeniowe jest wynikiem zmiany składowych stanu naprężenia, odniesionych do odpowiedniej płaszczyzny.

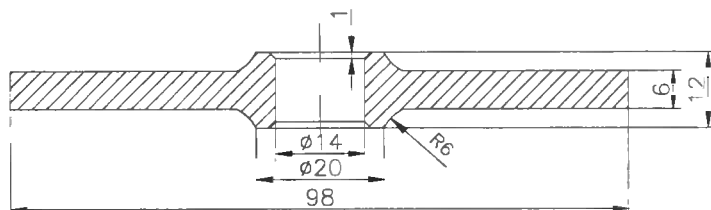


Rys. 7. Próbką do badań zmęczeniowych w kształcie dysku obrotowego [5]

3.5. Wybrane inne metody badawcze

W pracy [13] przedstawiono badania na dwóch grupach próbek, proponując w każdej grupie inny sposób kształtowania postaci geometrycznej próbki. Dla każdej grupy została wyznaczona, w warunkach kontrolowanego obciążenia, wartość granicy zmęczenia, odpowiadająca 10^7 cykli. Ze względu na trudność analitycznego wyznaczenia zależności między obciążeniem a wartością wywołanych nim naprężeń w części pomiarowej próbki, zależność tę wyznaczono doświadczalnie. Nie uszkodzoną próbkę poddano statycznemu obciążeniu o wartości granicy zmęczenia i metodą tensometryczną wyznaczono naprężenia w bazie pomiarowej.

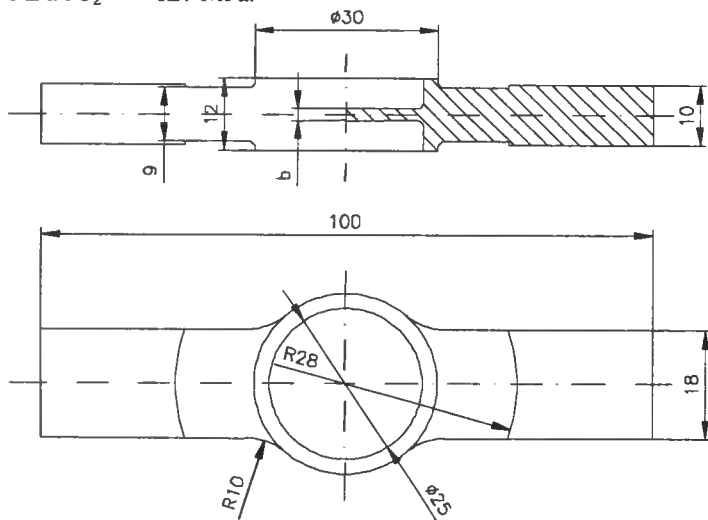
W pierwszej grupie próbka miała postać płaskiej tarczy kołowej, jak to przedstawia rysunek 8. Podczas badań zamocowana na obrzeżu próbka poddana była cyklicznemu zginaniu siłą przyłożoną do trzpienia zamocowanego w otworze. Dla próbki tej obliczono za pomocą równania różniczkowego wartości naprężeń promieniowych i obwodowych, a następnie porównano je z wartościami wyznaczonymi doświadczalnie. Na próbce tej badano wpływ kierunkowości struktury materiału na trwałość zmęczeniową.



Rys. 8. Płaska próbka kołowa [13]

Postać geometryczna próbki z drugiej grupy została przedstawiona na rysunku 9. Próbki o tej postaci zostały poddane wahadłowym obciążeniom rozciągająco-ściskającym. Porporcje naprężeń występujące w części pomiarowej modyfikowano poprzez zmianę

grubości próbki w tym miejscu. Dla próbki o grubości $b = 2,5$ mm uzyskano $\sigma_1^{\max} = 390$ MPa i $\sigma_2^{\max} = 222$ MPa, natomiast dla próbki o grubości $b = 1,5$ mm uzyskano $\sigma_1^{\max} = 455$ MPa i $\sigma_2^{\max} = 127$ MPa.



Rys. 9. Próbką do badań użyta w pracy [13]

W obu grupach opisanych w [13] badania przeprowadzono dla stali węglowej oraz dla stali stopowej chromowo-wanadowej. Dla obu gatunków stali wyniki badań w postaci wartości amplitud naprężeń σ_{a1} i σ_{a2} , po znormalizowaniu wartością Z_{rc} , przedstawiono na płaszczyźnie naprężeń głównych. Punkty wyznaczone podczas badań doświadczalnych na jednej próbce odkładano dwukrotnie, symetrycznie względem prostych $\sigma_{a1} = \sigma_{a2}$ i $\sigma_{a1} = -\sigma_{a2}$.

4. WNIOSKI

Przegląd doświadczalnych metod badania dwuosowego zmęczenia uwidacznia skutki braku norm w omawianym obszarze. Zarówno metody uznawane za standardowe, jak i niestandardowe charakteryzuje duża różnorodność stosowanych próbek oraz warunków prowadzenia badań.

Wśród niestandardowych sposobów badania dwuosowego zmęczenia najliczniejszą grupę stanowią doświadczenia prowadzone w warunkach obciążeń prostych, gdy złożony stan naprężenia wynika z geometrii próbki. Zaletą badań prowadzonych w warunkach obciążeń prostych są niższe koszty oraz większa dostępność stanowisk badawczych. Główne ograniczenia tych metod to brak możliwości wprowadzenia przesunięcia fazowego oraz konieczność modyfikacji wymiarów próbki w celu zmiany proporcji realizowanych naprężeń.

W dużej grupie metod niestandardowych do badań wykorzystywana jest płaska próbka płytowa poddana zginaniu. Najlepszą metodą w tej grupie, ze względu na rozkład naprężeń w próbce, jest metoda zakładająca użycie próbki romboidalnej. Naprężenia i odkształcenia rozkładają się jednorodnie w szerokim obszarze części pomiarowej tych próbek.

LITERATURA

- [1] Bartolotta P.A., Kantzos P., Krause D.L., 1997. In-plane biaxial yield surface study of cast titanium aluminide (TiAl). Proceedings of the 5th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue & Fracture, Cracow-Poland, Vol.2, 389-402.
- [2] Baum C., Ott W., Trautmann K.H., Buczynski A., Nowack H., 2001. Evaluation of the multiaxial crack initiation life prediction method EVICD for a modern tubes steel. Proceedings of the 6th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue & Fracture, Lisboa-Portugal, Vol.1, 415-422.
- [3] Blass J.J., Findley W.N., 1967. The influence of the intermediate principal stress on fatigue under triaxial stresses. Materials Research & Standards, Vol. 7, No. 6, 254-261.
- [4] El-Magd E., Mielke S., 1977. Dauerfestigkeit bei überlagerter zweiachsiger statischer Beanspruchung. Konstruktion 29, 253-257.
- [5] Findley W.N., Mathur P.N., Szczepanski E., Temel A.O., 1961. Energy versus stress theories for combined stress – a fatigue experiment using a rotating disk. Trans. ASME, J. Basic Engng. D, 83, 2, 10-14.
- [6] Kocańda S., Szala J., 1997. Podstawy obliczeń zmęczeniowych. PWN Warszawa.
- [7] Marquis G.B., Karjalainen-Roikonen P., 2001. Long-life multiaxial fatigue of SG cast iron. Proceedings of the 6th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue & Fracture, Lisboa-Portugal, Vol.1, 151-158.
- [8] McDiarmid D.L., 1991. A general fatigue criterion for high cycle multiaxial fatigue failure. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 14, No. 4, 429-453.
- [9] Morrison J.L.M., Crossland B., Parry J.S.C., 1956. Fatigue under triaxial stress: development of a testing machine and preliminary results. Proc. Inst. Mech. Engrs. 21, 170, 696-712.
- [10] PN-76/H-04325 Badanie metali na zmęczenie. Pojęcia podstawowe i ogólne wytyczne przygotowywania próbek.
- [11] PN-76/H-04326 Badanie metali na zmęczenie. Próba zginania.
- [12] PN-74/H-04327 Badanie metali na zmęczenie. Próba osiowego rozciągania-ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych.
- [13] Sawert W., 1943. Verhalten der Baustähle bei wechselnder mehrachsiger Beanspruchung. Z. Ver. Deut. Ing., 87, 39/40, 609-615.
- [14] Shin J.C., Lee S., Ryu J.H., 1995. Correlation of microstructure and fatigue properties of two highstrength spring steels. International Journal of Fatigue, Vol.21, 571-579.
- [15] Sonsino C.M., Grubisic V., 1985. Mechanik von Schwingbrüchen an gegossenen und gesinterten Konstruktionswerkstoffen unter mehrachsiger Beanspruchung. Konstruktion 37, 261-269.
- [16] Susmel L., Petrone N., 2001. Fatigue life prediction for 6082-T6 cylindrical specimens subjected to in-phase and out-of-phase bending/torsion loading. Proceedings of the 6th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue & Fracture, Lisboa-Portugal, Vol.1, 125-132.

- [17] Szewczuk J., Zamrik S.Y., Marin J., 1968. Low-cycle fatigue of 7075-T651 aluminum alloy in biaxial bending. *Experimental Mechanics*, 504-512.
- [18] Zamrik S.Y., Ledger D.J., Dante C., 1997. Fatigue characteristics of thin titanium plates due to biaxial stress cycling. *Proceedings of the 5th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue & Fracture, Cracow-Poland, Vol.2*, 167-187.

REVIEW OF EXPERIMENTAL METHODS OF BIAXIAL FATIGUE TESTING

Summary

The paper presents a review of experimental methods of biaxial fatigue testing. The review has been made from the point of view of specimen shaping. A group of methods considered standard has been given. The group includes the methods using solid specimens, thin-walled tubes and cruciform specimens. Also non-standard methods of biaxial fatigue testing have been widely described. The group includes methods which draw on thick-walled tubes, elliptical and rhombic plates, specimens in the shape of revolving disc and the specimens whose shape was developed by the author's.

Keywords: biaxial fatigue, testing methods

PRÓBA OPRACOWANIA TECHNIKI APLIKACJI PREPARATU
KONSERWUJĄCEGO DO WILGOTNEGO SIANA W CZASIE
JEGO ZBIORU PRASĄ ZWIJAJĄCĄ;
WSTĘPNA OCENA JAKOŚCI UZYSKANEGO SIANA*

Edmund Dulcet, Sylwester Borowski

Katedra Inżynierii Rolniczej
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-965 Bydgoszcz

W pracy opisano projekt badawczy dotyczący opracowania techniki aplikacji preparatu mikrobiologicznego Inoculant 1155 do wilgotnego siana zbieranego prasą zwijającą. Podano uzasadnienie podjęcia tego tematu oraz oczekiwane wyniki pracy. Ponadto przedstawiono metodykę i wyniki badań oceny jakości uzyskanego siana. Obliczono również koszty eksploatacji prasy zwijającej z aplikatorem i bez aplikatora.

Słowa kluczowe: technika zbioru wilgotnego siana, siano, aplikacja preparatów do siana

1. WPROWADZENIE

W kraju produkowana jest dostateczna ilość siana, natomiast jego jakość jest niezadowalająca. Straty składników pokarmowych przy tradycyjnych technologiach suszenia siana na pokosach w przeciętnych warunkach pogodowych wynoszą niekiedy 40-50 %, dochodząc nawet do 70 %. W naszych kapryśnych warunkach atmosferycznych produkcja siana związana jest z dużym ryzykiem, przy czym szczególnie dotyczy to siana zbieranego prasami w formie bel. Dopiero siano o zawartości wody (wilgotności względnej) 15-17 % może być przechowywane przez dłuższy okres bez obawy zepsucia się. Obniżenie wilgotności względnej siana do wyżej wymienionej granicy bezpieczeństwa wymaga znacznych nakładów energetycznych (suszenie aktywną wentylacją zimnym lub lekko podgrzanym powietrzem) [5, 6, 8, 11].

Użycie w technologii konserwacji siana preparatów chemicznych lub mikrobiologicznych umożliwia zbiór siana z lucerny lub mieszanek lucerny i traw i prasowanie go na polu już przy wilgotności względnej 25 %, czyli gdy jeszcze nie osypują (okruszają) się liście i kwiatostany roślin. Jest to więc energooszczędna metoda konserwacji wilgotnego siana, dająca ponadto więcej suchej masy i składników pokarmowych z hektara.

* Temat realizowany jest w ramach Grantu Nr 0910/PO6/2000/18

Skuteczność działania preparatów zależy od równomiernego wymieszania ściśle określonej ich ilości ze zbieranym sianem. Szczególnie dotyczy to preparatów chemicznych, które muszą mieć bezpośredni kontakt z tkankami zbieranych roślin [1, 2, 9, 10].

Ze względu na wysokie koszty uzyskania preparatów, wskazane jest minimalizowanie ich dawkowania poprzez optymalne wymieszanie ze zbieranym surowcem. Dotyczy to szczególnie siana prasowanego, w którym rozprowadzenie preparatu musi być przeprowadzone bardzo równomiernie podczas formowania się beli w prasie zwijającej. Istnienie bowiem jakichkolwiek mokrych miejsc w sianie prasowanym powoduje tworzenie się ognisk o aktywnej działalności szkodliwych bakterii, które mogą się rozprzestrzeniać i zniszczyć całą belę siana lub spowodować jej samozapalenie [3, 6].

2. CEL PRACY, JEGO UZASADNIENIE I OCZEKIWANE WYNIKI

Celem pracy jest metodyczne opracowanie procedur obliczeniowych do oceny jakości równomierności rozprowadzenia określonej ilości preparatu w wilgotnym sianie w czasie jego zbioru prasą zwijającą. W oparciu o zaproponowaną procedurę zostaną podjęte próby opracowania techniki aplikacji preparatu do wilgotnego siana zbieranego prasami zwijającymi.

Uzasadnieniem zajęcia się w kraju omawianym problemem jest fakt, iż stosowanie naturalnych preparatów mikrobiologicznych lub chemicznych w technologii konserwowania siana staje się metodą konkurencyjną w stosunku do energochłonnej technologii suszenia aktywną wentylacją z użyciem urządzeń suszących, przy jednocześnie niższych stratach suchej masy. Metoda ta jest jeszcze mało poznana.

Suszenie pojedynczych bel okrągłych powyższym sposobem jest bardzo pracochłonne i niedogodne w praktyce, a także wymaga dużych nakładów energii oraz istotnych zasobów inwestycyjnych na budowę stanowisk suszarniczych.

Istniejący stan wiedzy w zakresie omawianego tematu jest skromny, wręcz niedostateczny (rzadko przedstawiany w literaturze przedmiotu). Jest to bowiem problem nowy w kraju i na świecie, a nieliczne publikacje naukowe są szczątkowe i dotyczą najczęściej oceny jakości siana zbieranego różnymi metodami. Brak odpowiednich wyników badań naukowych uniemożliwia wdrożenie w praktyce rolniczej metody zbioru wilgotnego siana prasą zwijającą w formie bel okrągłych z równoczesnym równomiernym i efektywnym (skutecznym) dozowaniem preparatów zapobiegających psuciu się siana o podwyższonej zawartości wody.

Równomierne rozprowadzenie ściśle określonej ilości preparatu w wilgotnym sianie w czasie jego zbioru prasami zwijającymi jest procesem, w którym parametry eksploatacyjne pracy prasy zwijającej, aplikatora, właściwości dodawanych preparatów i zbieranych roślin determinują jakość tego procesu.

Zamierza się to osiągnąć poprzez odpowiedni dobór:

- miejsca dodawania preparatu do wilgotnego siana w czasie zbioru prasą zwijającą,
- parametrów eksploatacyjnych pracy prasy (wydajność zbioru uzyskiwanej gęstości bel),
- właściwości zbieranego materiału roślinnego (gatunek rośliny, wilgotność względna),
- stanu skupienia preparatów (stałe, ciekłe).

Preparaty mogą być dodawane do wilgotnego siana w różnych miejscach:

- przed podbieraczem (aplikacja preparatu na pokos lub wał zbieranego wilgotnego siana),

- nad podbieraczem (aplikacja preparatu na materiał roślinny znajdujący się na podbieraczu),
- pomiędzy podbieraczem a komorą zwijania (aplikacja preparatu na materiał znajdujący się w szczelinie roboczej).

Należy podkreślić, że według badań własnych - np. w siewkach zbierającej - w zależności od miejsca aplikacji preparatu do zielonki (zbiór na kiszonki) wskaźnik nierównomierności wymieszania preparatu z zielonką wahał się w granicach od 11 % do 27 %, a straty preparatu wynosiły od 12 % do 34 % [1].

Jakość rozproszczenia preparatu w zbieranym wilgotnym sianie i wielkość strat oceniano opierając się na jego analizie ilościowej oraz ocenie jakościowej uzyskanego siana przy uwzględnieniu metodyki badań i aparatury pomiarowej stosowanej w paszoznawstwie.

Oczekiwane wyniki:

- metodyczne opracowanie procedur obliczeniowych służących ocenie jakości rozproszczenia preparatu w wilgotnym sianie w czasie jego zbioru prasą zwijającą poprzez ustalenie optymalnych miejsc jego dodawania oraz parametrów eksploatacyjnych prasy zwijającej i właściwości zbieranego materiału,
- systematyzacja i uporządkowanie wiedzy o nowoczesnych energooszczędnych technologiach produkcji siana,
- opracowanie technologii zbioru wilgotnego siana w formie bel cylindrycznych z użyciem preparatów do wykorzystania w praktyce rolniczej.

3. BADANIA WSTĘPNE

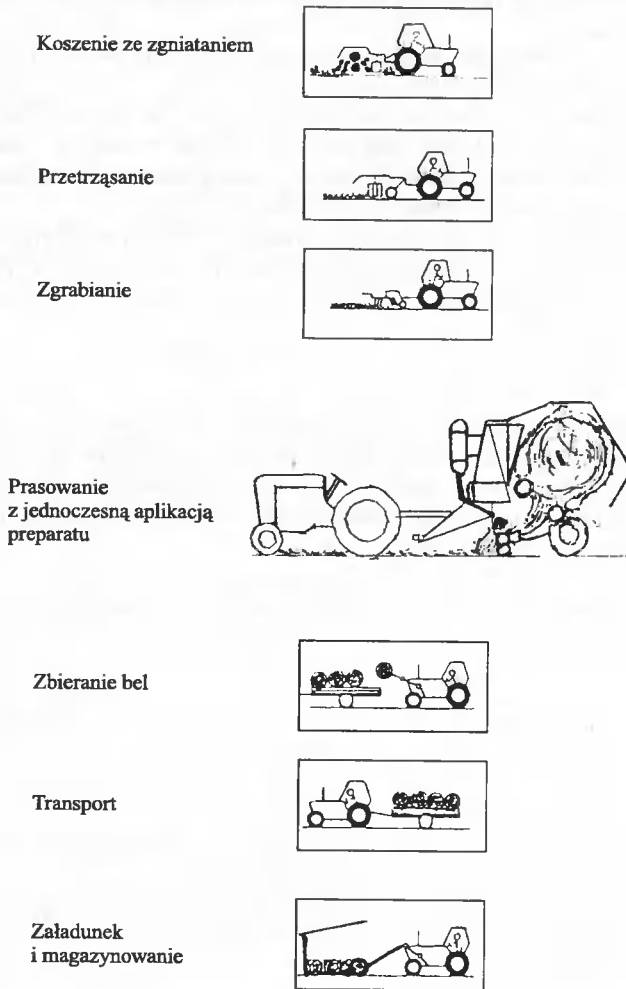
3.1. Cel badań

Celem badań była ocena jakości wilgotnego siana z dodatkiem preparatu mikrobiologicznego Pionier 1155 Inoculant zbieranego przy użyciu prasy zwijającej. Ponadto chodziło o obliczenie jednostkowych kosztów eksploatacji prasy zwijającej bez aplikatora i z aplikatorem.

3.2. Metodyka badań

Materiałem roślinnym użytym do badań był drugi pokos suszonej lucerny w pełnej fazie kwitnienia. Wilgotność zbieranego siana wynosiła odpowiednio: 26,4 %, 23,8 %, 19,2 %. Wilgotność siana określono metodą suszarkowo-wagową. W badaniach użyto preparatu mikrobiologicznego Inoculant Pioneer 1155 zawierającego wyselekcjonowane szczepy bakterii **Bacillus pumilus**, który podawano w ilości 1 kg na tonę zbieranego materiału roślinnego.

W skład zestawu badawczego wchodziły: kosiarka rotacyjna, przetrząsaczo-zgrabiarka karuzelowa, prasa zwijająca z nadbudowanym aplikatorem, ładowacz bel oraz przyczepa (rys. 1).



Rys. 1. Zestawienie podstawowych zabiegów przy zbiorze siana podczas badań

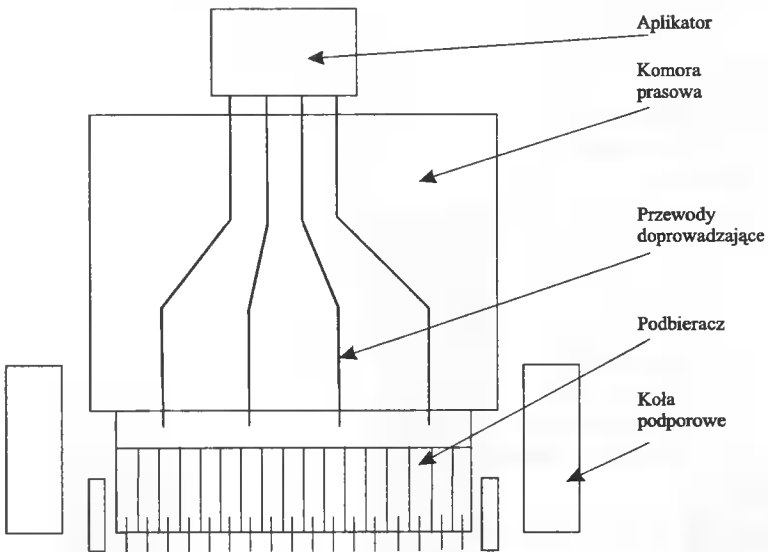
Do aplikacji preparatu wykorzystano dozownik "Gandy Jumbo", który nabudowano na prasie zwijającej Z-279/1 produkcji Simpa w Lublinie (rys. 2).

Dla równomiernego rozprowadzenia Inoculantu w całej masie zbieranego materiału roślinnego wykorzystano cztery otwory spustowe aplikatora, a końce węży rozmieszczono w równych odległościach, tak aby preparat spadał na siano znajdujące się na podbieraczu prasy zwijającej (rys. 3).

Bezpośrednio po zakończeniu prasowania bele siana przetransportowano do miejsca składowania (zadaszona wiata). Po czterech tygodniach od momentu wykonania bel z każdej z nich pobierano po 3 próbki do analizy chemicznej siana (po rozwinięciu beli - ze środkowej części i dwóch skrajnych - rys. 4).



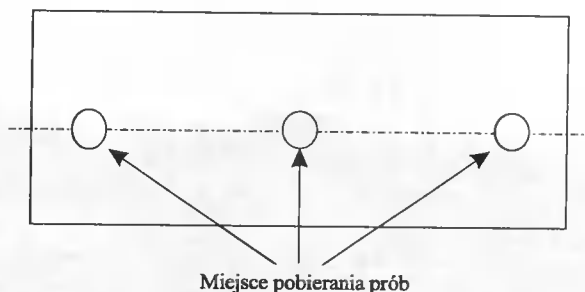
Rys. 2. Widok agregatu ciągnik - prasa zwijająca z aplikatorem w czasie badań



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia węży aplikatora nad podbieraczem prasy zwijającej

Analizę chemiczną próbek siana przeprowadzono aparatem Infra Alyzer 450 w laboratorium Katedry Żywienia Zwierząt i Paszoznawstwa ATR. Oznaczono:

- suchą masę,
- popiół surowy,
- białko roślinne,
- tłuszcz surowy,
- włókno surowe.



Rys. 4. Miejsca pobierania prób z beli siana

Uzyskane wyniki badań poddano analizie wariancji. Istotność różnic pomiędzy grupami doświadczalnymi oceniano testem rozstępu Tukeya [4]. Dla każdej wilgotności siana wykonano po 5 sztuk bel.

Obliczeń jednostkowych kosztów eksploatacji urządzenia dozującego dokonano na podstawie metodyki opracowanej w IBMER [7]. Na koszty eksploatacyjne k_e sprzętu rolniczego składają się koszty utrzymania k_u i koszty użytkowania k_{uz} , czyli:

$$k_e = k_u + k_{uz} \quad (1)$$

Koszt użytkowania obliczono z zależności:

$$k_u = k_a + k_k + k_{ub} \quad (2)$$

gdzie:

- k_a - koszt amortyzacji, zł;
- k_k - koszt przechowywania, zł;
- k_{ub} - koszt ubezpieczenia i podatku drogowego, zł.

Koszty użytkowania k_{uz} obliczono z zależności:

$$k_{uz} = k_n + k_p + k_{mp} + k_r \quad (3)$$

gdzie:

- k_n - koszt napraw, zł/h;
- k_p - koszt paliwa i smarów, zł/h;
- k_{mp} - koszt materiałów pomocniczych, zł/h;
- k_r - koszt robocizny, zł/rbh.

3.3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki analizy chemicznej próbek siana przedstawiono w tabeli 1. Podano je w procentach poszczególnych składników pokarmowych znajdujących się w suchej masie siana. Dane zawarte w tabeli 1 są średnimi arytmetycznymi.

Wartości pokarmowe 1 kg paszy (tabela 2) wyliczono w jednostkach owsianych i wartości skrobiowej, opierając się na danych zawartych w tabeli 1.

Z przeprowadzonych badań wynika, że największą wartość pokarmową wyrażoną w jednostkach owsianych i wartości skrobiowej (rys. 5 i 6) posiadało siano o wilgotności 23,8 % (0,634 jednostki owsianej, 0,3802 wartości skrobiowej), przy czym różnice w analizowanych wartościach pokarmowych dla poszczególnych grup doświadczalnych

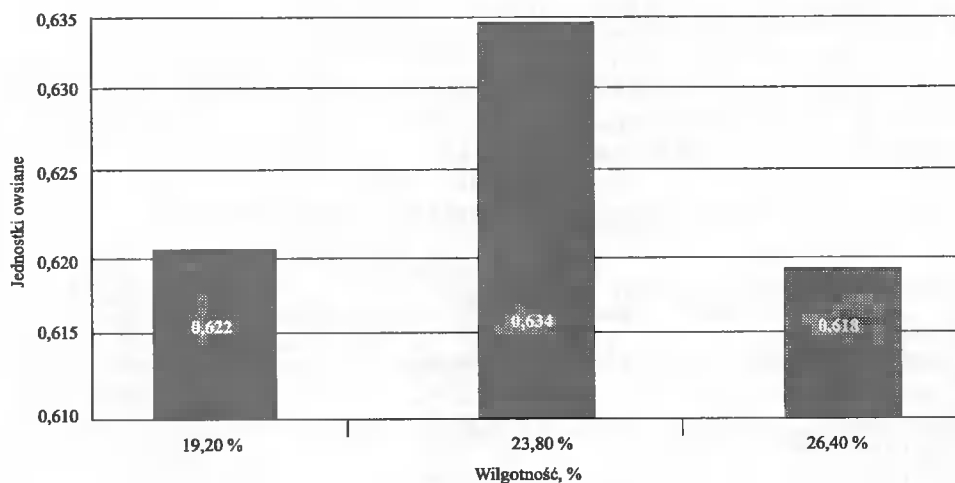
były niewielkie. Potwierdzeniem tego były wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej, która nie wykazała istotnych statystycznych różnic w badanych wartościach pokarmowych w zależności od wilgotności zbieranego siana.

Tabela 1. Wyniki analizy chemicznej siana z lucerny w przeliczeniu na 100 % suchej masy

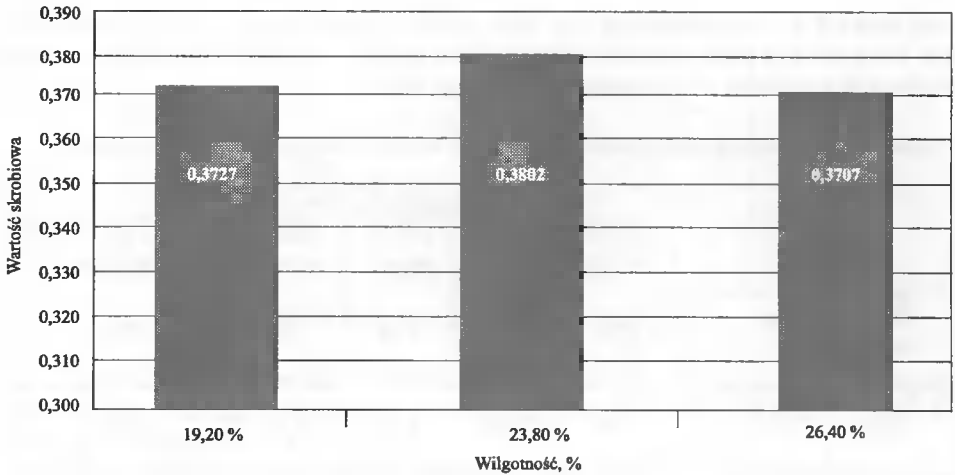
| Rodzaj próby wilgotność (%) | Składniki pokarmowe (%) | | | | |
|---|-------------------------|---------------|----------------|---------------|------------------------------|
| | popiół surowy | białko ogólne | tłuszcz surowy | włókno surowe | związki bezazotowe wyciągowe |
| A. Siano z lucerny naturalnie wysuszone bez preparatu 19,2 | 9,16 | 12,78 | 3,36 | 27,75 | 43,11 |
| B. Siano z lucerny z dodatkiem preparatu 26,4 | 8,88 | 11,31 | 3,32 | 28,11 | 44,51 |
| C. Siano z lucerny z dodatkiem preparatu 23,8 | 8,73 | 12,51 | 3,56 | 26,60 | 44,54 |

Tabela 2. Wartości pokarmowe w 1 kg siana z lucerny

| Rodzaj próbki wilgotność (%) | Jednostki owsiane | Wartości skrobiowe |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|
| A. Siano - 19,2 | 0,622 | 0,3727 |
| B. Siano - 26,4 | 0,618 | 0,3707 |
| C. Siano - 23,8 | 0,634 | 0,3802 |



Rys. 5. Histogram rozkładu jednostek owsianych dla różnych wilgotności siana



Rys. 6. Histogram rozkładu wartości skrobiowej dla różnych wilgotności siana

Wynika z tego, że zwinięte w bele cylindryczne prasowane siano z lucerny o zwiększonej wilgotności (próby B i C) bez dodatku preparatu Pioneer Inoculant 1155 mogłoby ulec zapleśnieniu i być narażone na wystąpienie reakcji gnilnych, które spowodowałyby uzyskanie siana złej jakości lub jego całkowite zniszczenie [9].

Z otrzymanych wartości pokarmowych wszystkich badanych prób (A, B, C) wynika, że stosowanie preparatu jest uzasadnione, gdyż zbioru siana można dokonać wcześniej skracając czas suszenia (w badanych warunkach o dwa dni), który w niekorzystnych warunkach pogodowych (wydłużony) wpływa na zmniejszenie wartości pokarmowej siana.

Badania powyższe będą kontynuowane w latach następnych z wykorzystaniem innych materiałów roślinnych (trawy, mieszanki traw z motylkowymi).

Z przeprowadzonej analizy kosztów stosowania prasy zwijającej bez aplikatora i z aplikatorem wynika (tabela 3), że wyposażenie prasy w to urządzenie zwiększa jednostkowy koszt eksploatacji tylko o 4,5 zł/ha, jednak zbiór siana z lucerny z dodatkiem preparatu jest wyższy prawie trzykrotnie.

Tabela 3. Koszty eksploatacji prasy zwijającej Z-279/1 bez aplikatora i z aplikatorem

| Rodzaj kosztu | Koszty jednostkowe prasy zwijającej | Koszty jednostkowe prasy z dozownikiem |
|--------------------------------|-------------------------------------|--|
| Koszt amortyzacji | 1660 zł/rok | 1783 zł/rok |
| Koszt garażowania | 598 zł/rok | 642 zł/rok |
| Koszt utrzymania | 2258 zł/rok | 2425 zł/rok |
| Koszt napraw | 1325 zł/rok | 1422 zł/rok |
| Koszt użytkowania | 1325 zł/rok | 1422 zł/rok |
| Koszt eksploatacji | 3583 zł/rok | 3847 zł/rok |
| Jednostkowy koszt eksploatacji | 62,5 zł/h | 67 zł/h |
| Koszt sznurka | 8 zł/ha | 8 zł/ha |
| Koszt preparatu | - | 125 zł/ha |
| Koszt zbioru siana | 70,5 zł/ha | 200 zł/ha |

Jest to spowodowane kosztami preparatu, którego cena w trakcie badań wynosiła 12,5 zł na 1kg, a jego zapotrzebowanie przy zbiorze lucerny to 1 kg na 1 tonę zbieranego materiału.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski:

1. Przeprowadzona analiza statystyczna uzyskanych wyników badań nie wykazała istotnych statystycznych różnic w wartościach pokarmowych siana (jednostki owsiane i wartości skrobiowe) niezależnie od wilgotności siana użytego w badaniach (19,2 %, 23,8 %, 26,4 %).
2. Użycie preparatu mikrobiologicznego Pioneer Inoculant 1155 pozwoliło skrócić przebywanie wilgotnego siana na polu o dwa dni, przy zachowaniu zbliżonych wartości pokarmowych w stosunku do siana naturalnie wysuszonego.
3. Koszty zbioru wilgotnego siana z użyciem preparatu mikrobiologicznego są około trzy razy wyższe w stosunku do zbioru bez użycia preparatu.

LITERATURA

- [1] Dulcet E., 1999. Dozowanie konserwantów. top agrar polska 4, 150-152.
- [2] Harrison P.H., 1985. Preservation of large Round Bales at High Moisture. Transactions of the ASAE 28 (3), 675-678.
- [3] Küntzel U., 1991. Stabilization of wet hay by preservatives. Landbauforschung Völkenrode. Sonderheft 123, 348-351.
- [4] Oktaba W., 1986. Metody statystyki matematycznej w doświadczałnictwie. PWN Warszawa.
- [5] Olszewski T., 1992. Analiza i ocena efektywności technologii zbioru zielonek na siano. Prace Naukowo-Badawcze. IBMER Warszawa.
- [6] Olszewski T., 1994. Dobór i racjonalne wykorzystanie środków do produkcji zielonek na siano. PWRiL Warszawa.
- [7] Pawlak Z., Wójcicki A., Muzelewski A., 1997. Dobór maszyn i ich racjonalne użytkowanie. IBMER Warszawa.
- [8] Podkówka W., Olszewski T., Kalisiewicz A., 1984. Technologia produkcji siana. PWRiL Warszawa.
- [9] Podkówka W., 1998. Kierunki w produkcji kiszzonek i siana w Europie. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 462, 25-39.
- [10] Rotz C.A., Sprott D.J., Daris R.J., Thomas J.W., 1986. Anhydrous Ammonia Injection into Balet Forage. Transactions of the ASAE 2(2), 64-69.
- [11] Sęk T., 1994. Eksploatacja agregatów do zbioru zielonek na siano. Wyd. AR w Poznaniu.

STUDIES ON THE DEVELOPMENT OF THE SYSTEM TO APPLY
ADDITIVE TO WET HAY IN A FORAGE HARVESTER;
PRELIMINARY ASSESSMENT OF THE WET HAY QUALITY

Summary

The paper describes a research project which aimed at developing a system to apply a microbiological preparation, Inoculant 1155, to wet hay harvested with a hay baler. The reasons which justify the present research and expected results are given. The research methodology and the hay quality results are presented. Finally, the maintenance costs of a harvester for harvesting with and without additive were calculated.

As compared with non-additive hay wilted naturally, for the wet hay treated with the microbiological additive *Pioneer Inoculant 1155* field-wilting time was reduced by two days without a noticeable nutritional value loss.

The cost of making wet hay treated with additive is about three times lower than that of the untreated wet hay (the cost of the applicator and additive).

Keywords: wet hay harvest technique, hay, hay preparations application

KONSTRUKCYJNE PRZETWARZANIE ŻYWNOSCI

Józef Flizikowski

Katedra Maszyn Spożywczych i Ochrony Środowiska
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pracy zaprezentowano podstawy użytecznej środowiskowo metody analizy maszyn środowiska żywności. Przedstawiono wyniki badań potencjałów badawczych sterowanych adaptacyjnie w kierunku: opisów matematycznych niezawodności wybranego lub wszystkich potencjałów działania, wpływającego (wpływających) na maszynowe środowisko żywności w sensie czynnym i biernym; przy czym jakość - estymator niezawodności - rozumiana jest jako odległość między odpowiedzią układu rzeczywistego a odpowiedzią zidentyfikowanego modelu niezawodności.

Słowa kluczowe: konstrukcje mechaniczne, środowisko, mechanika żywności

1. WPROWADZENIE

Od roku 1994 na Wydziale Mechanicznym ATR w Bydgoszczy prowadzone są intensywne prace studialne dotyczące przetwarzania żywności, mające na celu określenie pola wiedzy z zakresu inżynierii mechanicznej żywności. Zdania na temat inżynierii żywności są podzielone [1], a sama mechanika żywności nie oddaje istoty mechanicznego obszaru „*technologii żywności i żywienia człowieka*” - jako kierunku studiów. Dla ujawnienia głębi zagadnień mechanicznych, trzeba znaleźć nową płaszczyznę naukowych dociekań. Z wcześniejszych doświadczeń można wnioskować, że taką płaszczyzną dla wirtualnego przetwarzania żywności są maszyny, urządzenia i instalacje środowiska żywności.

2. KONSTRUKCJA MASZYN

Przyczyną wytworzenia, eksploatacji i „likwidacji” - „życia w środowisku” oraz obiektem poznania maszyny jest jej konstrukcja.

Istnieją zasady, kryteria, i racje przetwarzania konstrukcji w budowie maszyn środowiska przetwarzania żywności, wśród których wymienić należy przynajmniej:

- **kryterium optymalnych obciążeń** - rozumiane jako konieczność zabezpieczenia się przed szkodliwym oddziaływaniem maszyny na żywność, która może na-

stępnie szkodzić zdrowiu człowieka (prace nad obciążeniem energetycznym prof. zw. dr. hab. inż. J. Budnego, nad czyszczeniem wody - dr M. Jankowskiej);

- **kryterium optymalnego tworzywa** - dotyczące szczególnych wymagań w stosunku do tworzyw (z których buduje się elementy maszyn) oraz ich obróbki, a także opakowań stykających się z żywnością (badania Zakładu Maszyn Ochrony Środowiska - dr hab. inż. M. Bieliński);
- **kryterium optymalnej stateczności** - związane z koniecznością zapewnienia trwałości utrzymania maszyny w trakcie jej eksploatacji w wysokim stanie higieny, wyraźna specyficzność niektórych operacji technologicznych, niezwykle trudnych do ustabilizowania, zmechanizowania, a nawet zautomatyzowania; konieczność pomiaru, monitorowania i sterowania właściwości biologicznych żywności poddawanej uprzedniemu przetwarzaniu w maszynach (prace prof. dr. hab. inż. K. Sadekiewicza, dr. inż. M. Bogusza, dr. inż. F. Chwaścianka, dr. inż. J. Kalwaja);
- **kryterium optymalnych stosunków wielkości związanych** dotyczące trudności w utrzymaniu równomierności, sprawności, ciągłości procesów technologicznych realizowanych za pomocą maszyn, szybkiego postępu w dziedzinie wprowadzania tzw. „nowości” na rynku konsumenckie (prof. zw. dr hab. inż. Z. Kikiewicz, dr inż. Ali Al.-Zubiedy, mgr inż. A. Mroziński).

U podstaw konstruowania maszyn do produkcji surowców rolniczych oraz ich przetwórstwa i projektowania procesów technologicznych znajduje się wiedza o właściwościach fizycznych tych substancji. Chodzi o różne grupy właściwości: fizyczne, chemiczne, biologiczne, a ogólnie: technologiczne. W inżynierii żywności rozwija się specjalny dział zajmujący się właściwościami fizycznymi surowców rolniczych - **agrofizyka** [7]. Jej zadaniem jest przede wszystkim opracowywanie fizycznych metod określania powyższych właściwości.

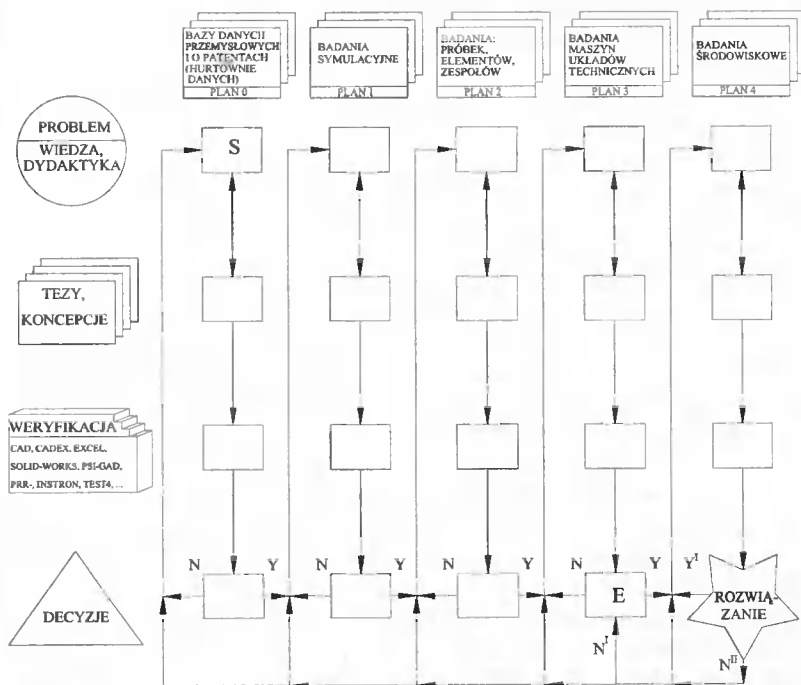
Natomiast w zakresie teorii konstrukcji maszyn i doświadczeń ważne jest postępowanie określające celowość, możliwości i ekologiczność działania układów technicznych, czyli pewne racjonalne podejście do stanu istniejącego i przemian generowanych rozważaną innowacją maszynową (rys. 1).

W przemyśle spożywczym podstawowe surowce rolnicze oraz półprodukty i produkty gotowe są biologicznie czynne. Według najogólniejszej definicji oznacza to, że zawierają one składniki o ważnej dla człowieka funkcji żywieniowej (również psychoaktywność żywności [10]), a ponadto, że ich postać fizyczna może ulegać istotnym zmianom, również w stałych warunkach termodynamicznych. Mając na uwadze złożoność sygnalizowanych zagadnień, w Katedrze Maszyn Spożywczych i Ochrony Środowiska WM ATR w Bydgoszczy zaproponowano oryginalną metodykę badań wspomagających konstrukcję i system przetwarzania żywności (rys. 1).

3. MODEL WSPOMAGANIA KONSTRUKCJI MASZYN

Przedstawione zasady, ujęte w sposób zbliżony do hierarchicznego, znajdują się u podstaw konstrukcji, budowy i eksploatacji maszyn dla środowiska żywności. Zatem maszyny i procesy technologiczne realizowane przy ich użyciu nie powinny obciążać zdrowia i środowiska człowieka oraz szkodliwie na nie oddziaływać [2-5, 8, 9, 11-14]. Dotyczyć to może nie tylko właściwości biologicznych, czy ogólnie odżywczych, lecz

również takich cech, jak struktura fizyczna, wygląd, zapach czy emisja hałasu podczas przetwórstwa.



Rys.1. Model wspomagania procesu przetwarzania konstrukcji maszyn w Katedrze MSiOŚ [3]: S - start, E - koniec, Y - tak, N - nie, N^I - „nie” drugiego stopnia wątpliwości, N^{II} - „nie” odpowiedzialności globalnej

Model wspomagania konstrukcji maszyn przetwarzania żywności z założenia obejmuje przestrzenie abstrakcyjne (plan 0-3) i konkretne (plan 4):

- bazy danych przemysłowych i patentowych, również hurtownie danych,
- procedury i badania symulacyjne koncepcji konstrukcyjnych,
- plany badań próbek, elementów, wirtualnych zespołów koncepcyjnych w zakresie właściwości mechanicznych,
- badania konstrukcyjne maszyn i układów fizycznych, technicznych, uzupełniające bazy wiedzy konstrukcyjnej.

Sfera konkretów wiąże się z monitorowaniem stanów i przemian rozwiązania maszynowego (ściśle według konstrukcji) w rzeczywistych, wirtualnych lub modelowych warunkach środowiska żywności (plan 4).

Warstwy, na których weryfikowane są poszczególne bazy, plany, procedury i badania konstrukcji dla przetwarzania żywności, wiążą się ze (rys. 1):

- sformułowaniem problemu i wiedzą badacza,
- umiejętnością formułowania odpowiedzi w postaci tez i koncepcji na stawiane pytania problemowe,
- wyposażeniem komputerowym w narzędzia wspomagania i weryfikacji tez oraz koncepcji konstrukcyjnych,

- potęgą, mądrością i bogactwem decyzyjnym, aż do ponoszenia odpowiedzialności za dzieło - w znaczeniu globalnym,
 - monitorowaniem przetwarzania, czyli przetwarzaniem i wykorzystaniem danych.
- Efekty wspomaganego wykorzystuje się również do budowy wiedzy o konstrukcji maszyn i środowisku żywności.

Z narzędzi do wspomaganie i weryfikacji procesu konstrukcyjnego należy wymienić co najmniej pięć najnowszych:

- Solid Works (S&W),
- Dynamic Desinger Motion (DDM),
- symulację obciążeń i charakterystyk rozdrabniania (TEST TPTS-4),
- pomiarowy system informacyjny PSI-GAD-4,
- system monitorowania mediów i przemian energetycznych SAPEN.

Solid Works jest programem umożliwiającym konstruowanie parametrycznych modeli trójwymiarowych. Program pracuje na stacjach roboczych wyposażonych w procesor Pentium lub Alpha. Praca w Solid Works przebiega w jednym z trzech związanych ze sobą trybów: tworzenia trójwymiarowego modelu, zespołu oraz rysunku wykonawczego. Tryb tworzenia modelu jest wyjściowy dla dwu pozostałych. Sercem tego trybu jest szkicownik oraz funkcja nadawania więzów. Szkicownik pozwala na tworzenie i edycję dwu- lub trójwymiarowych krzywych definiujących bryły lub powierzchnie. Jedną z ważniejszych funkcji szkicownika jest możliwość automatycznego tworzenia lustrzanego parametrycznego odbicia rysowanego konturu. Zmiana kształtu konturu definiującego pociąga za sobą zmianę odbicia lustrzanego.

Dynamic Designer Motion (DDM) jest produktem australijskiej firmy Design Technologies International. Wersja programu, którą posiada Katedra Maszyn Spożywczych i Ochrony Środowiska jest aktualnie najnowsza - DDM 2000 (wersja edukacyjna).

DDM jest aplikacją pracującą w popularnych systemach CAD, tj:

- AutoCAD i Mechanical Desktop,
- Solid Works,
- Solid Edge.

Program wykonuje analizy dynamiczne i kinematyczne oraz symuluje i animuje ruch konstrukcji mechanicznych, zarówno płaskich elementów geometrycznych, jak i trójwymiarowych brył lub powierzchni utworzonych w systemach CAD. Dynamic Designer Motion składa się z dwóch podstawowych modułów:

- Pre i Post procesora:
 - Modeller* - służy do budowy modelu,
 - Results Viewer* - do przeglądu i analizy wyników,
- Solvera: narzędzia dokonującego obliczeń numerycznych oraz symulacji złożenia systemu w najnowszej wersji - wywodzi się z większego systemu ADAMS.

TEST TPTS-4 - jest produktem Instytutu Matematyki i Fizyki oraz Zakładu Techniki Cyfrowych Wydziału Telekomunikacji i Elektrotechniki ATR w Bydgoszczy. Przeznaczony jest do symulacji danych o materiale, maszynie, procesie i celach rozdrabniania recyklatów tworzyw sztucznych przeznaczonych do dalszego przetwórstwa lub utylizacji. Wymaga wprowadzenia liczbowych wskaźników wytrzymałościowych: surowców i tworzyw poddawanych próbom fenomenologicznym; cech konstrukcyjnych (postaci, wymiarów i tolerancji elementów) zespołu rozdrabniającego, napędowego i sterującego; parametrów przetwarzania mechanicznego: czasu początkowego, końcowego i kroku analizy oraz danych liczbowych o przyjętych celach rozdrabniania (przyrost powierzchni właściwej, stopień rozdrobnienia, energetyka środowiska itd.).

PSI-GAD-04 - jest produktem Zakładu Technik Cyfrowych Wydziału Telekomunikacji i Elektrotechniki ATR w Bydgoszczy. Przeznaczony jest do gromadzenia i analizy danych oraz sterowania nimi w procesach pomiaru efektywności przetwarzania wszelkich materiałów i jakości wsadu, a także produktu ich rozdrabniania w zadanym celu. Struktury operacyjne procedury:

Wejścia - opisują co jest podłączone do poszczególnych kanałów przetwornika pomiarowego i określają, jak zamieniać mierzone wartości elektryczne na rzeczywiste mianowanie.

Stale - są wartościami współczynników wykorzystywanych przy obliczaniu *definicji*.

Definicje - elementy składowe tabel (kolumny) i wykresów (osie). Są to wzory określające, w jaki sposób należy wyznaczyć kolejne wartości w danej kolumnie i na wykresie na podstawie *Wejść* i *Stalych*, przy wykorzystaniu funkcji matematycznych *Interpretera*.

Powyższe struktury zawierają pole *Symbol* z unikalną nazwą, na podstawie której *Interpreter* rozpoznaje daną wielkość.

Interpreter - interpretuje wzory opisujące *Definicje* i wyznacza ich wartości korzystając ze zmierzonych wielkości.

Tabele - jest to lista tabel określonych przez podanie *Definicji* będących kolumnami tabeli. Kolejne wiersze tabeli odpowiadają kolejnym pomiarom.

Wykresy - to lista wykresów określonych przez podanie *Definicji*, których wartości będą odnoszone do osi pionowych oraz wyznaczeniu *Definicji* zmienności wartości na osi poziomej. Dzięki temu możliwe jest uzyskiwanie wykresów nie będących funkcjami.

SAPEN - produktem bydgoskiej firmy SAPEN - Grupa TELMAX. Przeznaczony jest do monitoringu energetycznego, utrzymania ruchu np. całego kraju, miasta, w dowolnym zakładzie przemysłowym: procesorze energii - elektrowni, zakładzie energetycznym, elektrociepłowni, cementowni, hucie, gospodarstwie rolnym, stacji wodociągowej, hotelu, bloku mieszkalnym itd. Różnorodność informacji, wynikających z funkcjonowania systemu, pozwala na aktywne korzystanie z jego możliwości: obliczanie chwilowych i globalnych wskaźników efektywnościowych: jednostkowego zużycia energii, generowanie rozdzielników energii, pomiary chwilowych i uśrednionych wielkości dynamicznych, tj. temperatury, ciśnienia, siły, masy, strumienia masy, momentu obrotowego, mocy, prędkości itp., koordynację funkcjonowania całego systemu, procesu czy też zakładu (szybki wgląd do zestawień globalnych i cząstkowych). Zakres wykorzystania SAPENA zależy od stopnia rozwoju organizacji działania systemu. Aktywne monitorowanie środowiska energetycznego może być skierowane na rozwój całego systemu organizacyjno-technicznego zakładu przetwórczego.

4. NASTĘPSTWA PRZETWARZANIA ŻYWNOCI

Postęp techniki i rozwój konstrukcji maszyn w przetwarzaniu żywności może być przyczyną niezamierzonych zjawisk wpływających na zdrowie społeczeństw.

Przemysł młynarski zabiega o maszyny, które wywołują tzw. „wysokie przemiały”, czyli maksymalnie wysokie wydobycie składników ziarna i usunięcie z mąki wierzchniej wartościowej okrywy. Przy czym nowoczesne kierunki rozwoju rozdrabniania wiążą się z precyzyjnym rozdrabnianiem otrąb i całych ziarniaków (prof. J. Flizikowski).

Szczególne wymagania w stosunku do tworzyw, z których budowane są elementy maszyn i opakowań stykających się z żywnością oraz wymagania w stosunku do metod

obróbki tych tworzyw wiąże się z możliwością oddziaływania składników tworzyw na produkty spożywcze poprzez tworzenie związków nie tylko nieobojętnych dla żywienia człowieka, ale również zagrażających jego zdrowiu [9]. Natomiast sposób obróbki związany jest z problemem utrzymania powierzchni maszyn w stanie wysokiej higieny.

Surowce rolnicze biologicznie czynne, pozostawione w stałych warunkach temperatury, ciśnienia i objętości, po upływie pewnego czasu zmieniają swoje właściwości, mimo że wymienione parametry stanu pozostały nie zmienione. Zmiany te mogą być tak radykalne, że substancja nie przypomina postaci początkowej ani zamierzonej [6, 14].

Tak więc, postęp w inżynierii żywności wymaga monitorowania, mierzenia i wyrażania w postaci liczb coraz szerszej gamy właściwości fizycznych i mechanicznych surowców rolniczych, aby można było właściwie konstruować maszyny i programować procesy technologiczne. Do tej pory technologia żywności nie odczuwała tak silnie potrzeby wyraźnie sprecyzowanych i fizycznie mierzalnych właściwości. Posługiwała się ona tradycyjnymi pojęciami, wśród których na planie pierwszym były właściwości sensoryczne (smak, smakowitość, zapach, barwa) czy teksturowe (kruchość, twardość, elastyczność, konsystencja). Te pojęcia były określane w sposób subiektywny przez osoby, których odczucia smakowe, zapachowe, wzrokowe były wzorcem dla innych. Tymczasem w procesie przetwarzania energomaterii nie sposób zadać wielkości zdefiniowanej jako „konsystencja właściwa”, „barwa typowa” itp. Maszynie trzeba te właściwości zadać pod postacią liczb. Jeżeli konstruktorzy maszyn dla przemysłu spożywczego i rolnictwa mają rozmawiać wspólnym językiem z technologami, ekologami i rolnikami, którzy wiedzą, jakie cechy chcieliby uzyskać w gotowym produkcie, to język ten może być właśnie językiem liczb, znaków reprezentujących fizycznie mierzalne właściwości surowców rolniczych i produktów spożywczych.

Są jednak wyraźne braki w określeniu właściwości mechanicznych (konstrukcyjnych, w sensie cech geometrycznych, materiałowych i dynamicznych) surowców rolniczych i gotowych produktów. W przypadku większości środków spożywczych, których głównym składnikiem jest woda, przyjmuje się, że wymienione właściwości są bliskie wodzie. Np. ciepło właściwe piwa, wina, mleka, soków owocowych czy warzywnych przyjmuje się jako równe w przybliżeniu ciepłu właściwemu wody. Podobnie uważa się, że opory przepływu tych cieczy w prostych rurach, jak i przez przeszkody hydrauliczne są podobne do oporów przepływu wody [1].

Przetwarzaniu konstrukcji maszyn środowiska żywności brakuje informacji, jak przedstawiają się zmiany tych właściwości w funkcji zmiennych przetwórczych: temperatury, ciśnienia, prędkości przepływu.

5. PODSUMOWANIE

Konstruktorzy maszyn do przetwarzania żywności są uzależnieni od rozwoju wiedzy w dziedzinie technologii żywności, a nawet żywienia człowieka.

W niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych maszyn dla przemysłu spożywczego staramy się sięgnąć do „biotechniki”, nawiązując do rozwiązań występujących u żywych organizmów. Podpatrzone w przyrodzie rozwiązania wchodzą dopiero w fazę wstępnych studiów, np. przeniesienie konstrukcji źdźbła traw do miejscowego różnicowania wytrzymałości u typowych elementów maszyn. Tak więc pojęcie inżynierii możemy zdefiniować jako zastosowanie techniki w wybranej dziedzinie działalności człowieka.

Inżynieria mechaniczna żywności **będzie więc oznaczała zastosowanie osiągnięć mechaniki i innych nauk technicznych w środowisku hodowania, przetwarzania, przechowywania, przemieszczania, podawania i „likwidacji” żywności.**

W rozwoju poszczególnych dziedzin produkcji i przetwarzania żywności ważną rolę odgrywało innowacyjne, skokowe osiągnięcie pewnego wyższego poziomu techniki.

Dziś przechodzimy bardzo pośpiesznie od etapu intensywnego stosowania w rolnictwie technik „syntetycznych” w kierunku coraz powszechniej stosowanych technik „biologicznych”. Jedną z nich jest nowoczesnie rozumiana **biotechnologia**, w obrębie której rozwija się **inżynieria genetyczna**. Techniki te nie cofają się przed ingerencją w świat ożywiony. Jeszcze do niedawna pojęcie inżynierii lub działania inżynierskiego właściwe było jedynie w odniesieniu do działań na materii nieożywionej. Jej użycie w odniesieniu do materii ożywionej wymaga zaistnienia określonego, i to bardzo wysokiego poziomu etyki oraz ekologii ogólnej [1]. Istotne jej zadania w odniesieniu do sfery produkcji oraz przetwarzania surowców rolniczych z przeznaczeniem do żywienia człowieka to:

- minimalizacja niekorzystnych etycznie i ekologicznie skutków intensyfikacji,
- określenie właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych surowców rolniczych i ich egalizacja,
- opracowanie podstaw doskonalenia przetwarzania konstrukcji i rozwoju maszyn spożywczych oraz rolniczych,
- obniżenie strat surowców rolniczych w każdym obszarze inżynierii, zwłaszcza w fazie ich pozyskiwania,
- obniżanie zużycia energii, energochłonności bezpośredniej i skumulowanej surowców rolniczych i spożywczych,
- maksymalizacja jakości produktu.

Kolejnym z istotnych zadań inżynierii przetwarzania żywności jest minimalizacja, niekorzystnych ekologicznie, skutków intensyfikacji produkcji surowców rolniczych, gdyż automatyzacji, mechanizacji, jak i chemizacji rolnictwa nie uda się gwałtownie przerwać.

Występowaniu strat sprzyja poszerzające się przemysłowe przetwórstwo żywności.

Wreszcie zagadnienie racjonalnej gospodarki energią odpadami i ściekami, szczególnie ważne w obliczu nasilającego się antagonizmu między gospodarką energią i gospodarką żywnością. Pogłębia się uzależnienie ilości produkowanej żywności od możliwości zaopatrzenia systemu gospodarki żywnościowej w energię.

Obecnie coraz częściej mówi się o konieczności uzależnienia poziomu techniki, a pośrednio i rozwoju gospodarczego, od pozostających do naszej dyspozycji zasobów energii. Chociaż powszechnie wiadomo, że postęp cywilizacji wiąże się z obniżaniem strat i nieefektywnego zużycia energii.

Zasygnalizowano wybrane aspekty powiązań inżynierii przetwarzania żywności, budowy i eksploatacji maszyn, mechaniki, chemii, rolnictwa, produkcji i przetwórstwa w środowisku żywności.

W syntetycznej formie zaprezentowane zostały związki **agrotechniki** i jej szczególnych dziedzin, jakimi są np. inżynieria żywności, inżynieria rolnicza - z inżynierią materiałową, inżynierią mechaniczną, inżynierią chemiczną oraz scalającą je nowoczesną dyscypliną naukową: **ekotechniką żywności**.

Losy przetwarzania konstrukcji, tworzyw, żywności i energii - jako podstawowych obszarów działania Katedry - potoczą się prawdopodobnie tak, jak ułożą się wzajemne relacje między: poziomem techniki i pionem żywności w naturalnej środowiska.

LITERATURA

- [1] Budny J., 2000. PROMOCJE POMORSKIE. Bydgoszcz.
- [2] ENERGIA, 1996-1999. Zagadnienia energetyki niekonwencjonalnej z wybranego okresu publikacyjnego: od nr 1/96 do nr 3/01. Agencja Promocji Poszanowania Energii, Warszawa.
- [3] Flizikowski J., 1998. Projektowanie środowiskowe maszyn. WMN ATR Bydgoszcz.
- [4] Flizikowski J., 1998. Rozdrabnianie tworzyw sztucznych. WMN ATR Bydgoszcz.
- [5] Flizikowski J., Bieliński K., 2000. Projektowanie środowiskowych procesorów energii. WMN ATR Bydgoszcz.
- [6] Glattes H., 2001. New Aims and Objectives of ICC. Inżynieria Maszyn 17, 17-18, Bydgoszcz.
- [7] Grundas S., 2001. Określenie cech fizycznych pojedynczych ziarniaków pszenicy przy zastosowaniu technik rentgenowskich i systemu SKCS. Inżynieria Maszyn 17, 51-58, Bydgoszcz.
- [8] Johansson A., 1997. Czysta technologia. WNT Warszawa.
- [9] Kikiewicz Zb., Flizikowski J., 1997. Zasoby energii i drewna dla środowiska XXI wieku. Inżynieria Maszyn 9, 6-21, Bydgoszcz.
- [10] Kostyra H. i zespół, 2001. Żywność psychoaktywna. Inżynieria Maszyn 17, 21-24 Bydgoszcz.
- [11] Niewiedział E., 1998. Aktualne zasady tworzenia taryf na moc i energię elektryczną. III OP Kurs Techniczno-Szkoleniowy Poznań-Kiekrz XII 1998.
- [12] Pahl M.H., 1994. Umwelt und Energie. Universitaet-GH, WUZ, Paderborn.
- [13] Siemiński M., 1994. Fizyka zagrożeń środowiska. PWN Warszawa.
- [14] Tkacz K., Budny J., 2001. Żywność wygodna i funkcjonalna w przemyśle spożywczym. Inżynieria Maszyn 17, Bydgoszcz, 153-160.

CONSTRUCTIONAL FOOD PROCESSING

Summary

This paper presents a framework of environmental food-processing machinery analysis method and the results of the study into scientific potentials actively controlled to obtain mathematical descriptions of reliability of a selected or of all the operating potentials and active and passive effects on the food-processing machinery environment. The quality, used to estimate reliability, is the distance between the reaction of the real system and the reaction of the reliability model identified.

Keywords: machine designing, environment, food-processing machines

IDENTYFIKACJA STRUKTURY SYSTEMU DLA POTRZEB ZARZĄDZANIA EKSPLOATACJĄ

Zdzisław Jaskulski

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

Artykuł jest efektem przemyśleń związanych z realizowanymi pracami aplikacyjnymi w dwóch firmach bydgoskich. Przedstawiono strukturę systemu eksploatacji, zaproponowano również niezbędne modele służące do identyfikacji danych, punktów ich generowania i struktury systemu. W ramach struktury systemu przypisano poszczególnym modułom realizowane funkcje.

Słowa kluczowe: zarządzanie, eksploatacja, system, struktura systemu

1. WPROWADZENIE

Przedsiębiorstwo jest złożonym systemem gospodarczym składającym się z wielu podsystemów. W literaturze przedmiotu spotyka się dyferencjacje przedsiębiorstwa na różną ilość elementów. Większość autorów, między innymi [1] i [9], do swoich rozważań używa podziału organizacji gospodarczych na 14 podsystemów (rys. 1). Kryteria służące do ich wyodrębniania nie będą przedmiotem tego artykułu. Znaczna część funkcji realizowanych w ramach poszczególnych podsystemów jest charakterystyczna dla wszystkich przedsiębiorstw prowadzących działalność produkcyjną. W zależności od przyjętego kryterium podziału występuje mniejsza lub większa agregacja funkcji w poszczególnych podsystemach. Każde przedsiębiorstwo istnieje dla określonego celu, którego miernikiem syntetycznym jest najczęściej osiągnięty zysk netto. Przeprowadzone [3] badania potwierdzają, że na osiągnięte wyniki podstawowy wpływ ma proces zarządzania firmą. Proces zarządzania organizacją, podobnie jak jej struktura, nie jest jednorodny i statyczny. Obydwa wspomniane tu składniki powinny reagować dynamicznie na zmieniającą się strategię firmy, która jest reakcją na zachodzące w otoczeniu firmy zdarzenia. Każda z organizacji gospodarczych ma określony system zarządzania, który spełnia jej wymagania w zakresie realizacji przyjętej strategii. Systemy zarządzania stosowane w przedsiębiorstwach produkcyjnych są ukierunkowane na osiąganie celów strategicznych firmy, które priorytetowo traktują podsystemy produkcyjne, marketingowe i finansowe. Nie podważając zasadności takiego postępowania należy się zastanowić, w jakim stopniu optymalny system zarządzania dla całej firmy jest również optymalny dla poszczególnych podsystemów. Jest to szczególnie istotne dla tych z nich, które mają istotny wpływ na przebieg procesu produkcyjnego (logistyka, eksploatacja, narzędzia i przyrządy) lub nadzorują środki trwałe o istotnej - z punktu widzenia firmy -

wartości. Znacząca część opracowań np. [2, 7] dotyczy zagadnień związanych z obszarem produkcji, na który patrzy się jako na dostawcę określonych produktów w określonym miejscu i czasie po kosztach akceptowanych przez otoczenie. Można uznać, że problemy istniejące w tym obszarze znalazły swoje rozwiązania badawcze i aplikacyjne. Akceptowana filozofia pracy systemów produkcyjnych, bez przestojów spowodowanych awariami maszyn i urządzeń, wymaga jakościowych zmian w zarządzaniu systemami eksploatacji. Problemy będą narastały wraz z przybliżaniem technologicznym i organizacyjnym naszych firm do systemów zintegrowanego wytwarzania. Można przypuszczać, że utrzymujące się obciążenie pracodawców z tytułu zatrudniania pracowników, będzie wymuszało zastępowanie tych ostatnich przez nowe systemy technologiczno-produkcyjne. Proces ten jest już zauważalny i powoduje między innymi przekwalifikowanie pracowników produkcyjnych na eksploatacyjnych. Jeżeli do wspomnianych już przerw w procesie produkcyjnym dodamy jeszcze znaczący wpływ eksploatacji na koszty, jakość i terminy realizacji zadań produkcyjnych to penetrację tego obszaru można uznać za zasadną. Zasygnalizowane problemy bieżące i przyszłe, związane z eksploatacją maszyn i urządzeń produkcyjnych, uwidaczniają również znaczenie systemu eksploatacji dla funkcjonowania całego przedsiębiorstwa.



Rys. 1. Struktura przedsiębiorstwa traktowanego jako system (opracowano na podstawie [7])

2. OTOCZENIE WEWNĘTRZNE

Otoczeniem wewnętrznym dla podsystemu eksploatacji jest struktura podsystemowa organizacji wraz z realizowanymi przez poszczególne podsystemy funkcjami. Podział na podsystemy wynika z realizowanych funkcji. Zakres ten może być znacznie zróżnicowany. Przykładowo, organizacja bardziej rozbudowana może w ramach podsystemu gospodarki narzędziowej posiadać wydział produkujący narzędzia. Przedsiębiorstwo małe będzie posiadało podręczny magazyn narzędzi i ewentualnie ich prostą regenerację. Podobnie jest rozwiązywany problem agregacji poszczególnych funkcji. W wielu polskich firmach łączy się podsystem produkcji z podsystemem środków trwałych lub gospodarkę materiałową z technicznym przygotowaniem produkcji. Zależy to od wielu elementów, które są przedstawione między innymi w [6]. Każdy z wymienionych podsystemów funkcjonalnych jest zarządzany przez przypisany do niego podsystem zarządzania.

3. CHARAKTERYSTYKA PODSYSTEMU EKSPLOATACJI W ZAKRESIE REALIZOWANYCH PODSTAWOWYCH FUNKCJI

Przyporządkowane dla poszczególnych podsystemów funkcje, w zależności od organizacji, mogą być realizowane w całości, częściowo lub nie realizowane w ogóle w poszczególnych podsystemach. Zostały one omówione w pozycji [6]. Dla potrzeb tej publikacji funkcje przypisane podsystemowi eksploatacji zostały przedstawione szczegółowo.

Funkcje podsystemu:

- prowadzi klasyfikację i ewidencję wszystkich środków trwałych,
- proponuje podstawowe wskaźniki techniczno-ekonomiczne gospodarki środkami trwałymi,
- nadzoruje eksploatację środków trwałych,
- analizuje dane z monitoringu i podejmuje decyzje,
- wnioskuje likwidację środków trwałych,
- planuje, nadzoruje i realizuje wszystkie rodzaje przeglądów, konserwacji i napraw,
- ustala podstawowe normatywy,
- ewidencjonuje i rozlicza prowadzone prace,
- planuje zaopatrzenie w części zamiennie i materiały potrzebne do napraw,
- nadzoruje realizację zamówień w tym zakresie,
- wnioskuje i uzasadnia leasing,
- wnioskuje i uzasadnia wypożyczenie,
- organizuje magazynowanie części zamiennych ich wydawanie oraz rozliczanie,
- planuje zadania inwestycyjne,
- organizuje i realizuje zakup maszyn i urządzeń oraz szkolenia,
- realizuje niezbędne prace budowlano-montażowe,
- organizuje odbiór środków trwałych,
- organizuje całość prac związanych z produkcją i regeneracją części zamiennych (jeżeli jest taka potrzeba),
- przygotowuje konstrukcje i technologie napraw.

Analizując zakres funkcji przypisanych do realizacji podsystemowi można określić, jakie grupy danych powinny do niego wpływać, jak również jakie dane on generuje.

4. MODEL ZARZĄDZANIA SYSTEMEM EKSPLOATACJI

Przedsiębiorstwo jest systemem, który posiada w swojej strukturze dwa elementy czyniące jego zachowanie trudno programowalnym i zawodnym. Elementami tymi są cele i zadania oraz ludzie. Człowiek, na przekór założeniom teorii behawiorystycznej, jest istotą pobudzaną zarówno przez racjonalne motywy, jak i przesłanki irracjonalne. Zdolności adaptacyjne człowieka nie są nieograniczone. Jakkolwiek duża, ma on jednak ograniczoną inteligencję, zdolność przewidywania, ograniczony zasób wiedzy, wreszcie ograniczoną zdolność magazynowania, kojarzenia i przetwarzania danych otrzymywanych z zewnątrz. Stąd proces zarządzania też nie jest działaniem deterministycznym, lecz probabilistycznym. Istnieje wiele definicji zarządzania organizacją. Profesor J. Gościński [1] definiuje system zarządzania następująco: „przez system zarządzania należy rozumieć

strukturę procesu podejmowania decyzji”. Według Pszczołowskiego [9] „Zarządzanie (management, gestion, verwaltung...) sztuka łączenia różnych środków, którymi dysponuje przedsiębiorstwo, tak aby osiągnęło ono swoje cele z maksymalną skutecznością”. Propozycja definicji zarządzania podsystemem eksploatacji jest następująca:

ZARZĄDZANIE podsystemem eksploatacji to efektywna realizacja funkcji polegających na doborze ilościowym i strukturalnym środków, zgodnego z przeznaczeniem ich zastosowania i eksploataowania, ciągłego utrzymania w gotowości eksploatacyjnej, bieżącego monitorowania stanu i zmian oraz prowadzenia uzasadnionej technicznie i ekonomicznie wymiany.

Proponowana definicja równocześnie wyznacza cele, które są stawiane podsystemowi do realizacji. Ażeby mógł on je realizować, musi posiadać niezbędne zasilenia. Każde przedsiębiorstwo jest układem cybernetycznym. Charakteryzuje się ono trzema podstawowymi cechami wyróżniającymi je ze zbioru wszystkich układów:

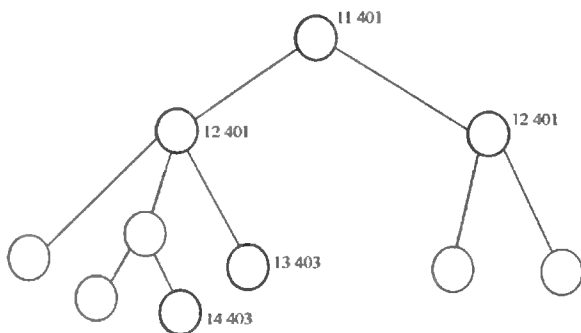
- szczególna złożoność układu,
- probabilistyczny charakter transformacji wejść na wyjście,
- zdolność układu do samoregulacji w zmiennych warunkach działania.

Jak już wspomniano, podsystem może wtedy realizować swoje zadania, jeżeli ma odpowiednie zasilenia. Wstępną klasyfikację informacji dla potrzeb zarządzania PE przedstawiono w tabeli 1. Klasyfikację opracowano na podstawie analizy przepływu danych w dwóch bydgoskich zakładach produkcyjnych z wykorzystaniem [3, 8, 10].

Tabela 1. Wstępna klasyfikacja informacji dla potrzeb zarządzania SE

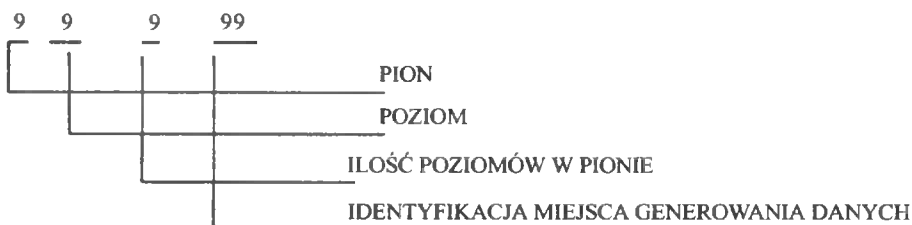
| Kod informacji | Opis informacji |
|----------------|--|
| 1 | 2 |
| 01 | Planistyczne |
| 02 | Normatywne |
| 03 | Decyzyjne |
| 04 | Analizyczne |
| 05 | Monitoringowe |
| 06 | Finansowe (w tym koszty) |
| 07 | Kadrowe |
| 08 | Motywacyjne |
| 09 | Sprawozdawcze |
| 10 | Awaryjne |
| 11 | Logistyczne (potrzeby, stany, transport, itp.) |
| 12 | Dokumentacja (K+T) |
| 13 | Korekcyjne |
| 14 | Kontrolne |
| 15 | Inne |

Przetwarzanie danych dla potrzeb zarządzania odbywa się w poszczególnych węzłach (poziomach) organizacji. Dla potrzeb pełnej identyfikacji przekazywanych informacji niezbędna jest wiedza, z jakich podsystemów ona pochodzi oraz z jakiego poziomu została nadana. Podobny problem dotyczy również adresatów informacji wychodzących z podsystemu. Zasady identyfikacji węzłów oraz poziomu lokalizacji danego węzła w strukturze organizacji przedstawiono na rysunku 2.

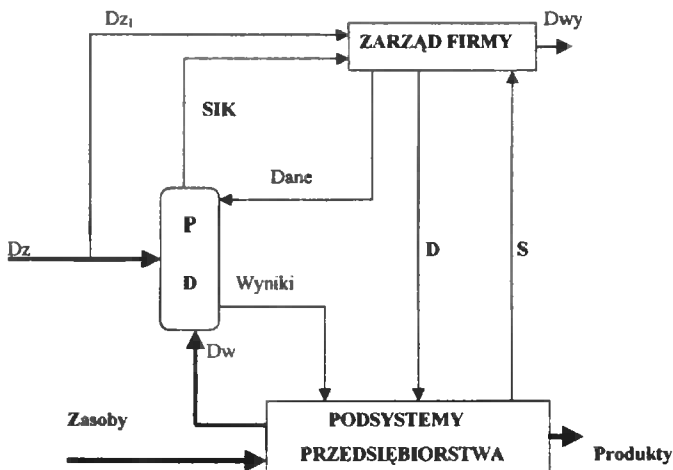


Rys. 2. Identyfikacja miejsca generowania danych
(źródło: prace własne [4])

Proponuje się kod mieszany o następującej strukturze:



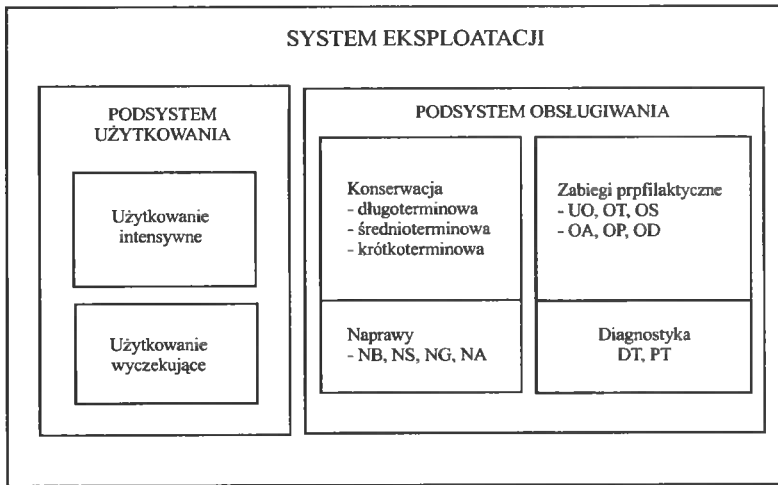
Jak już wspomniano, zarządzanie systemem eksploatacji jest częścią zarządzania całą firmą. Rysunek 3 przedstawia podstawowe zasilenia przedsiębiorstwa rozpatrywanego z poziomu zarządzania „Zarządu firmy”, jak również wyjścia w postaci informacji i produktów. Natomiast na rysunku 4 przedstawiono strukturę funkcjonalną SE.



Rys. 3. Zarządzanie przedsiębiorstwem poziom TM
(źródło: prace własne)

Objaśnienie skrótów:

- Dz - dane zewnętrzne,
 Dz₁ - część danych zewnętrznych wchodząca bezpośrednio do zarządu firmy,
 PD - przetwarzanie danych,
 SIK - system informowania kierownictwa,
 Dw - dane wewnętrzne,
 Dwy - dane wyjściowe.



Rys. 4. Struktura systemu eksploatacji (źródło: [11])

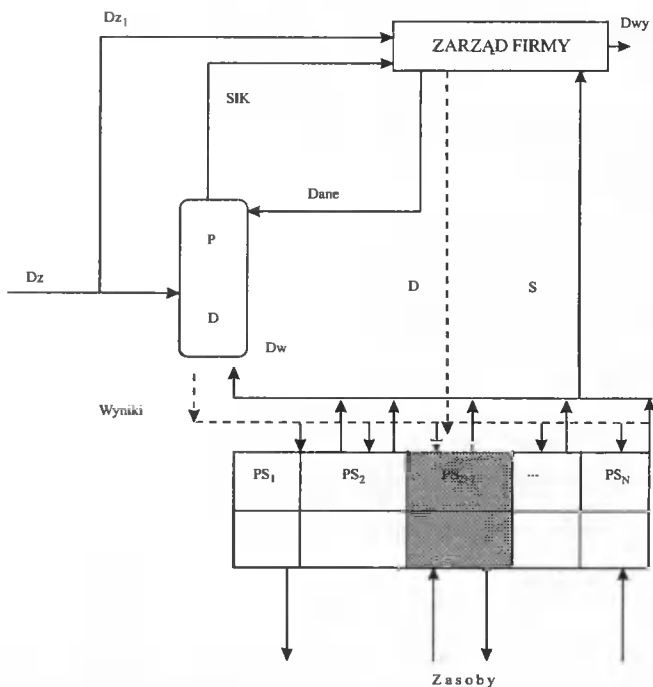
Narzędzia używane do przetwarzania danych są w znacznym stopniu zróżnicowane. W firmach będących obiektem badań stosowano wspomaganie komputerowe. W żadnej z nich nie spotkano systemu zintegrowanego zarządzania. Na rysunku 5 przedstawiono podział strumieni danych zasilających podsystemy (Dw i D), jak również danych generowanych przez te podsystemy.

Na rysunku szóstym przedstawiono strukturę zarządzania systemem eksploatacji wraz z przepływem danych. Tworzące strukturę systemu poszczególne moduły realizują następujące podstawowe funkcje:

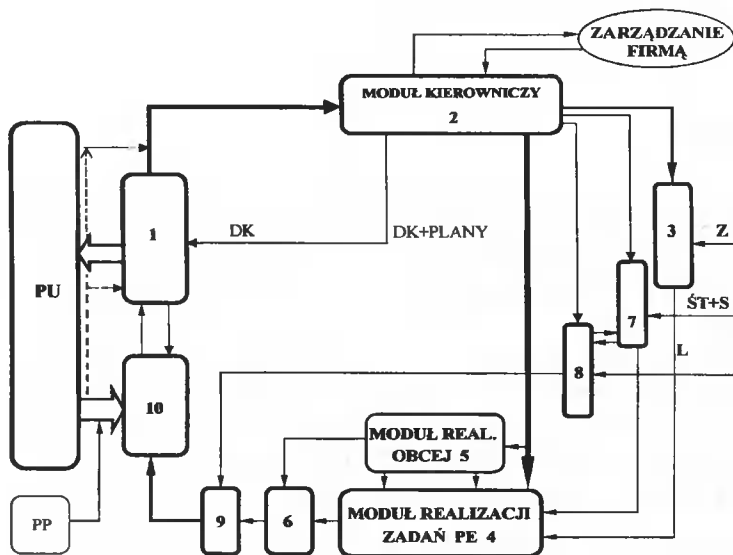
Moduł przetwarzania danych jest odpowiedzialny za przetwarzanie danych. W zależności od stopnia wspomaganie komputerowego obejmuje on swoim zasięgiem zróżnicowaną ilość danych. Umownie do modułu tego należy zaliczyć również przetwarzanie realizowane w innych modułach systemu eksploatacji. Moduł ten może działać w oparciu o wspólną bazę danych lub o dane rozproszone.

Moduł techniczny realizuje funkcje:

- planistyczne,
- konstrukcyjne,
- technologiczne,
- monitoringowe,
- oceny,
- ewidencji i aktualizacji,
- emisji dokumentacji.



Rys. 5. Podstawowe przepływy informacji dla średniego poziomu zarządzania (MM) (źródło: prace własne)



Rys. 6. Model zarządzania systemem eksploatacji (źródło: prace własne [3, 4])

Moduł rozliczeń realizuje rozliczenia:

- pracochłonnościowe,

- materiałowe,
- usług,
- inne.

Moduł kontroli realizuje kontrole w zakresie:

- dostaw środków,
- eksploatacji,
- napraw,
- procedur systemu jakości.

Moduł realizacji własnej wykonuje:

- operacje demontażu, wymiany i montażu,
- regeneracji i produkcji.

Moduł obsługi realizuje:

- obsługę logistyczną, łącznie z gospodarką magazynową dla potrzeb SE,
- odnowę bazy technicznej,
- organizację szkolenia pracowników SE i PP (pozostałych podsystemów).

5. PODSUMOWANIE

Budowa modelu systemu zarządzania eksploatacją pozwoliła na zidentyfikowanie podstawowych elementów jego otoczenia, a także modułów wchodzących w skład samego podsystemu. Zdefiniowanie funkcji realizowanych przez poszczególne moduły, jak i uwzględnienie elementów kosztowych pozwoli na stworzenie procedur działania podsystemu. Umożliwi również zarządzanie danymi niezbędnymi dla potrzeb funkcjonowania tego obszaru.

LITERATURA

- [1] Grudzewski W, Pietrowski H., 1989. Modułowa organizacja przedsiębiorstwa. Zeszyty Naukowe IOPM, Warszawa.
- [2] Hess J., 1993. Das Rationalisierungspotential ich noch Lange nicht ausgeschopft. Handelsblat, Berlin.
- [3] Jaskulski Z., 1999. Wpływ wybranych czynników wewnętrznych na sprawność zarządzania firm produkcyjnych. Mat. Konf. Diagnostyka 99, Bydgoszcz.
- [4] Jaskulski Z., 2000. Model zarządzania podsystemem eksploatacji. 2nd International Conference Multimedial in Business 2000, Częstochowa.
- [5] Kelly A., 1993. The mechanizm of management. ACCA Berlin.
- [6] Lewandowski J., 1998. Zarządzanie środkami trwałymi. PWN Warszawa.
- [7] Muhleman A.P., 1997. Zarządzanie, produkcja i usługi. PWN Warszawa.
- [8] Pietrowski H., 1981. Modułowy system organizacji przedsiębiorstwa. PWE Warszawa.
- [9] Pszczołowski T., 1978. Mała encyklopedia prakseologii i teorii organizacji. Zakład Narodowy im. Osolińskich Wrocław.

- [10] Winiewicz A., 1998. Założenia do wprowadzenia zleceńowego systemu sterowania produkcją. Praca końcowa studium Inżynierii zarządzania i marketingu, ATR Bydgoszcz.
- [11] Żółtowski B., 1996. Diagnostyka techniczna elektrycznych urządzeń przemysłowych. Wyd. ATR Bydgoszcz.

IDENTIFICATION OF THE SYSTEM STRUCTURE FOR OPERATION MANAGEMENT

Summary

This article constitutes a feedback based on the system implementation in two Bydgoszcz-based companies. There has been presented a system operation structure, suggested indispensable data recognition models, their generation locations and the system structure. Within the system structure, respective modules were related to specific functions.

Keywords: management, operation, system, system structure.

WPLYW PROMIENIA ZAOKRĄGLENIA KRAWĘDZI SKRAWAJĄCEJ NA CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI PRZY SKOŚNYM SKRAWANIU

Hubert Latoś, Tadeusz Leppert

Katedra Inżynierii Produkcji,
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pracy przedstawiono badania wpływu promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej na chropowatość powierzchni obrobionej po toczeniu jednokrawędziowym nożem skośnym o prostoliniowej krawędzi skrawającej. Pokazano technikę kształtowania i pomiaru promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej.

Słowa kluczowe: toczenie, promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n , chropowatość powierzchni

1. WSTĘP

Powszechne stosowanie narzędzi skrawających składanych, w których własności eksploatacyjne w dużym stopniu zależą od wymiennej płytki skrawającej, powoduje, że stereometryczne cechy ostrza, w tym krawędzi skrawającej, są przedmiotem zainteresowania wielu ośrodków naukowych i badawczych [1, 6, 9, 11, 12]. Krawędź skrawająca wywiera istotny wpływ na przebieg procesu skrawania oraz efekty obróbki, między innymi w postaci jakości obrobionej powierzchni [2, 4, 7].

W ujęciu geometrycznym krawędź skrawająca jest linią ukształtowaną w wyniku przecięcia się dwóch powierzchni - natarcia i przyłożenia - i w zależności od ich kształtu może być odcinkiem prostoliniowym lub krzywoliniowym. W sensie fizycznym ich przecięcie wytwarza powierzchnię przejściową o zarysie zależnym od przyjętego sposobu i warunków kształtowania ostrza [11]. W przekroju normalnym do krawędzi skrawającej powstała obwiednię najczęściej aproksymuje się łukiem o promieniu r_n . Istotne znaczenie ze względu na wytrzymałość i niezawodność ostrza, jak również jakość obrobionej powierzchni ma właściwy dobór zarysu i wielkości promienia zaokrąglenia r_n [8, 10].

Polska Norma (PN-85/M-18000) [5, 8] dotycząca oznaczenia krawędzi płytek wielostrzowych, zgodna z międzynarodową normą ISO, wyróżnia następujące rodzaje zarysu krawędzi skrawającej:

- krawędź skrawającą ostrą, dla której promień zaokrąglenia $r_n \leq 0,02$ mm (F),
- krawędź skrawającą zaokrągloną, dla której promień zaokrąglenia $r_n > 0,02$ mm (E),
- krawędź jednościńową (T),

- krawędź jednościńową zaokrągloną (S),
- krawędź dwuścińową (K),
- krawędź dwuścińową zaokrągloną (P).

Dla określonych warunków skrawania, w których występuje szereg ograniczeń, winny być stosowane ściśle określone zakresy wartości promienia zaokrąglenia r_n . Nieodpowiednio dobrane wartości promienia, w obróbce z większymi przekrojami warstwy skrawanej lub w obróbce przerywanej, powodują wykruszanie się krawędzi skrawającej, wywołując w konsekwencji spadek trwałości narzędzia. W obróbce bardzo dokładnej promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej ostrza wywiera istotny wpływ w procesie zdejmowania warstwy skrawanej na geometryczne i fizyczne własności warstwy wierzchniej [3, 4]. Do czynników determinujących dobór promienia krawędzi skrawającej zaliczyć należy: sposób obróbki i jego dynamiczną charakterystykę, materiał ostrza i jego pokrycie oraz rodzaj materiału obrabianego przedmiotu. Ważnym zagadnieniem w kształtowaniu krawędzi skrawającej, poza odpowiednim zarysem i wartością promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej, jest uzyskanie pożądanej jego wartości i kształtu wzdłuż całej długości krawędzi skrawającej oraz minimalnej szczyrbałości ostrza, na co decydujący wpływ ma sposób i warunki ostrzenia [6, 9]. Zalecane wartości promienia krawędzi skrawającej r_n zależnie od warunków skrawania i rodzaju obróbki zawierają się w granicach od 0,02 do 0,2 mm [1, 5, 11].

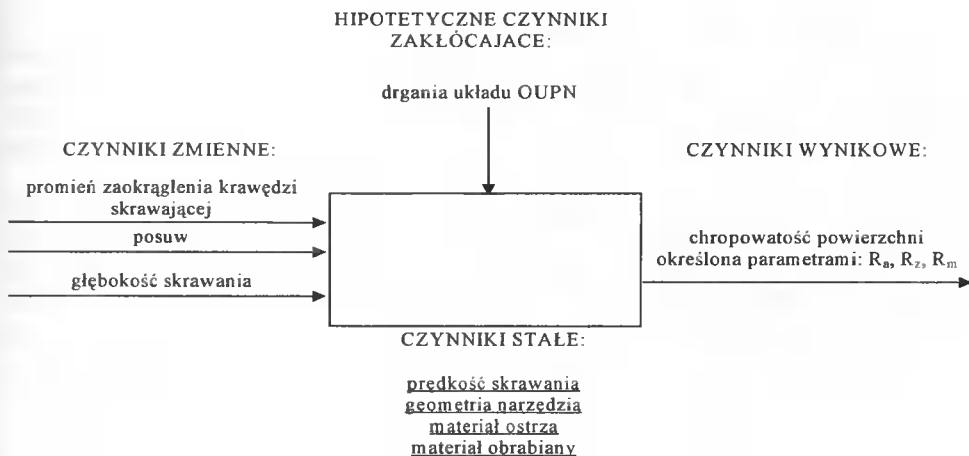
Większość wcześniej prowadzonych prac zarówno w ośrodkach naukowych, jak i przemysłowych dotyczy zagadnień wytrzymałości ostrza oraz zależności związanych z minimalną grubością warstwy skrawanej oraz fizycznymi aspektami warstwy wierzchniej, natomiast w mniejszym stopniu relacji uwzględniających chropowatość powierzchni. Brak uwzględnienia w tych pracach skośnego skrawania uzasadnia podjęcie niżej prezentowanych badań.

2. METODYKA BADAŃ I UKSZTAŁTOWANIE KRAWĘDZI SKRAWAJĄCEJ

Celem prezentowanych badań było określenie wpływu promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej ostrza na chropowatość powierzchni określoną trzema parametrami:

- R_a - średnim arytmetycznym odchyleniem profilu od linii średniej,
- R_z - wysokością chropowatości,
- R_m - maksymalną wysokością chropowatości.

Czynnikami zmiennymi były: wartość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej o pięciu różnych wartości mieszczących się w przedziale od 0,01÷0,25 mm, posuw i głębokość skrawania. Czynnikami stałymi były: prędkość skrawania, geometria narzędzia (z wyłączeniem promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej), materiał ostrza i materiał obrabiany. W badaniach zastosowano program badań statyczny zdeterminowany selekcyjny jednoczynnikowy. Model obiektu badań przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat modelu obiektu badań

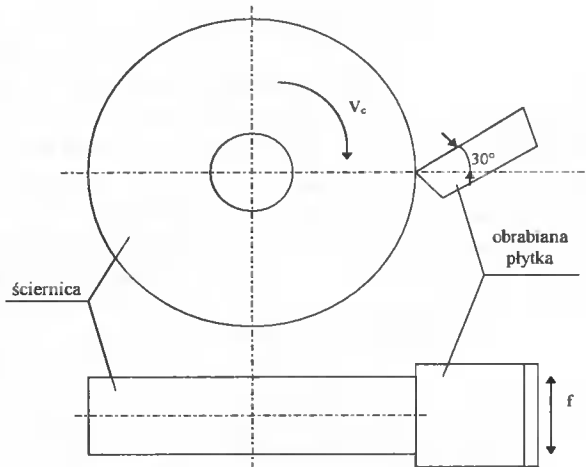
W badaniach zastosowano operację toczenia z użyciem noża jednokrawędziowego skośnego, składanego o prostoliniowej krawędzi skrawającej, wyposażonego w płytki wieloostrowe o symbolu SPUN120308 produkcji firmy Sandvik Baildonit z węgliku spiekanego SM25 (P25) o promieniu zaokrąglenia krawędzi skrawającej $r_n = 0,04$ mm.

Zmianę promienia wyjściowego płytek wieloostrowych przeprowadzono stosując dwie metody obróbki:

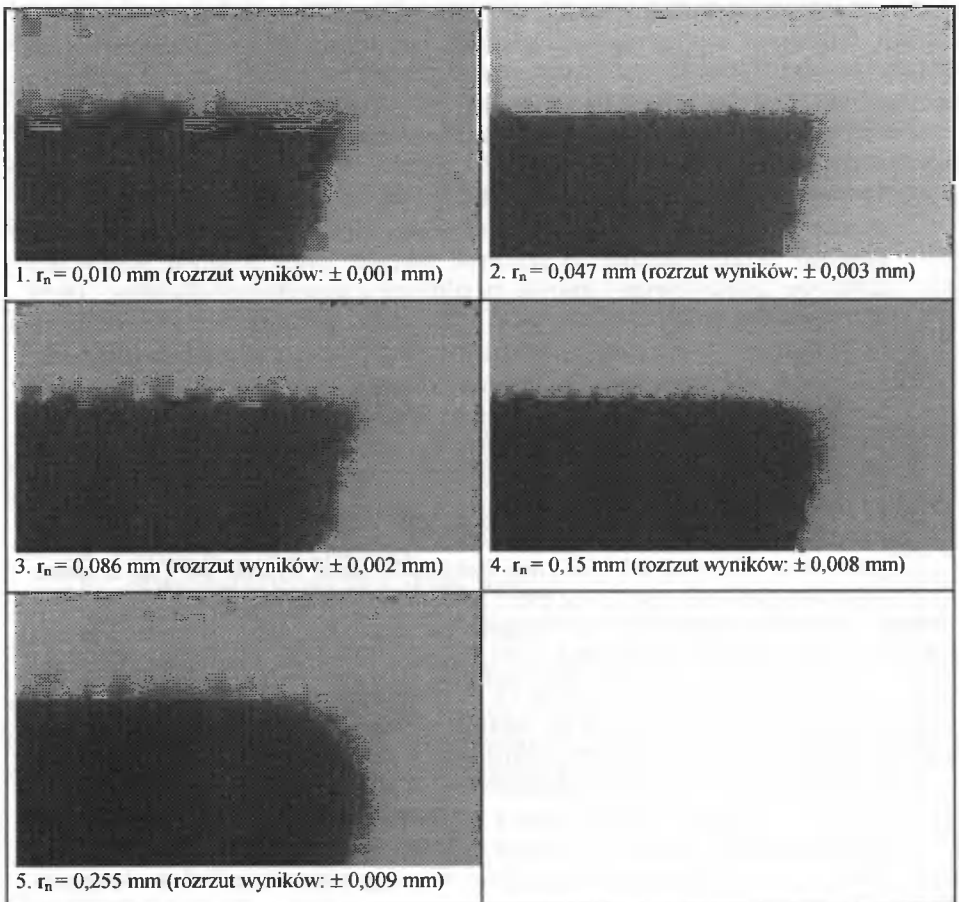
- a) szlifowanie i dogładzanie powierzchni przyłożenia płytki, w celu uzyskania promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej mniejszego od promienia wyjściowego, przeprowadzone na szlifierce ostrzarce firmy Agathon, ściernicami o nasypie diamentowym i spoiwie metalowym o koncentracji diamentu 100 % (oznaczenie ściernicy 57002 D100 B2 75) oraz o spoiwie żywicznym i koncentracji diamentu 15 % (oznaczenie ściernicy 8x2 C30 D15 RN) dla dogładzania;
- b) szlifowanie obrotową szczotką ścierną krawędzi skrawających płytek w celu uzyskania promieni zaokrąglenia większych od promienia wyjściowego płytek. Szlifowanie przeprowadzono ściernicą elastyczną wykonaną z włókien tworzywa sztucznego napełnionych ścierniwem - węglikiem krzemu o ziarnistości 80 mesh. Prędkość skrawania ustalono na poziomie 16 m/s. W celu uzyskania różnych wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej przyjęto dwie głębokości szlifowania 1 i 1,5 mm. Czas szlifowania wynosił od 1 do 3 minut. Schemat ustawienia płytki względem narzędzia przedstawia rysunek 2.

Pomiar wielkości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawających płytek realizowano przy pomocy kamery wideo CDD zaopatrzonej w obiektyw o powiększeniu około 120x, zintegrowanej z komputerem IBM PC z zainstalowanym oprogramowaniem do pomiarów wielkości obserwowanych na ekranie, poprzez porównywanie ich z wcześniej wprowadzonym do pamięci wzorcem długości - CSS Video Frame Grabber.

Pomiaru promienia zaokrąglenia dokonywano w płaszczyźnie prostopadłej do mierzonych krawędzi skrawającej z pięciokrotną powtarzalnością. Na podstawie wartości średnich arytmetycznych wyników pomiarów, a także oceny regularności kształtów zaokrąglenia krawędzi do badań wytypowano płytki skrawające o promieniach zaokrąglenia $r_n = 0,01; 0,05; 0,09; 0,15; 0,25$ mm (rys. 3).



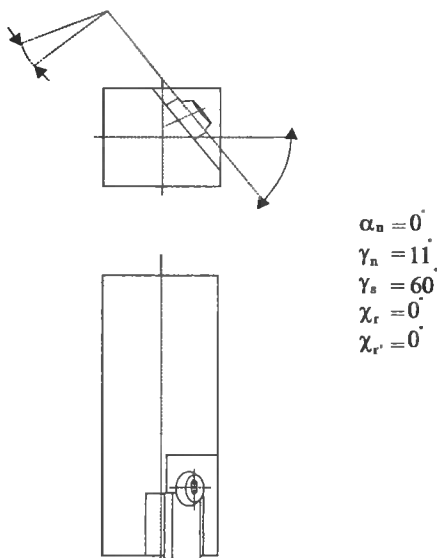
Rys. 2. Schemat ustawienia płytki wieloostrowej podczas zaokrąglania krawędzi skrawającej



Rys. 3. Zarysy krawędzi skrawających ostrza wraz z wartościami promieni zaokrąglenia

Zastosowanie w badaniach noża jednokrawędziowego skośnego, składanego, o prostoliniowej krawędzi skrawającej (rys. 4) umożliwiało kształtowanie, w procesie toczenia wzdłużnego, powierzchni obrobionej wyłącznie krawędzią skrawającą bez udziału wierzchołka ostrza, a tym samym pozwoliło dokonać oceny wpływu promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej na jakość obróbki.

Badania wpływu promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej na chropowatość powierzchni przeprowadzono dla stopu aluminium PA 6 TA, przy stałej prędkości skrawania $v_c = 50$ m/min i zmiennym posuwie o wartościach $f = 0,105; 0,262; 0,473; 0,736; 0,945$ mm/obr. oraz głębokości skrawania $a_p = 0,3$ i $0,5$ mm, na tokarce uniwersalnej SNB 40 (produkcji rumuńskiej). Głównym czynnikiem badanym był promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej, który przyjmował pięć następujących wartości: $r_n = 0,01; 0,05; 0,09; 0,15; 0,25$ mm.



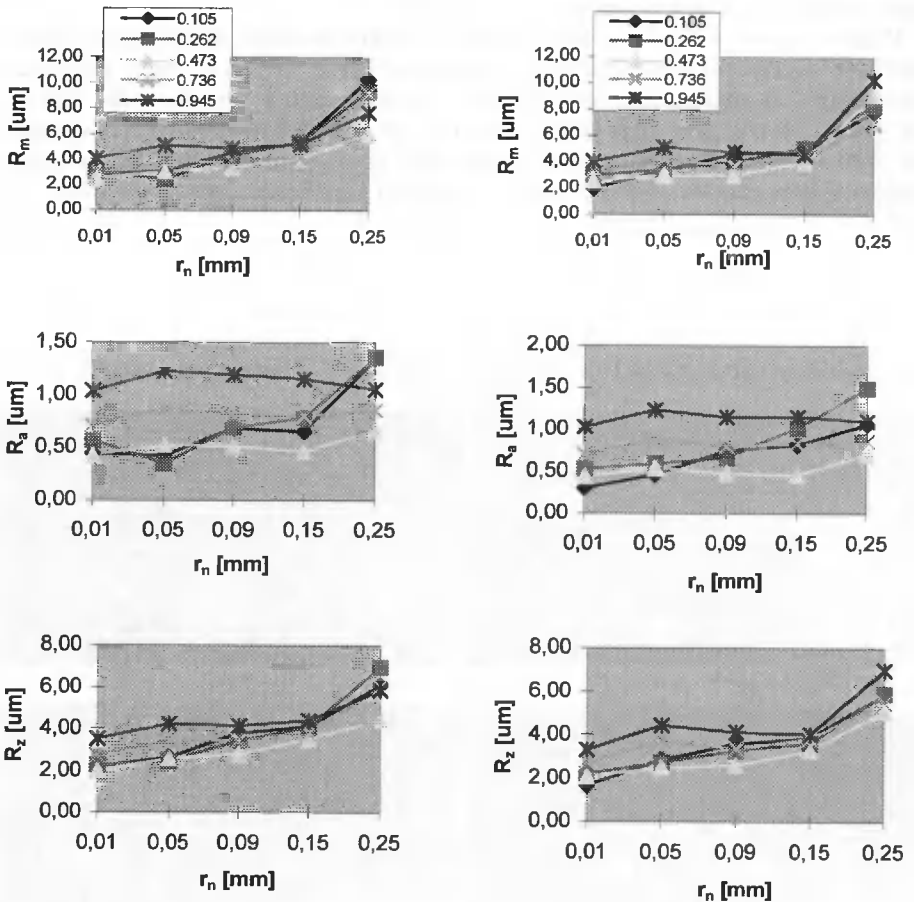
Rys. 4. Geometria noża tokarskiego jednokrawędziowego, skośnego o prostoliniowej krawędzi skrawającej

Ocenę chropowatości powierzchni przeprowadzono na profilografometrze Hommel-Tester T2000 na podstawie parametrów chropowatości: R_a , R_z , R_m , przy długości odcinka elementarnego $l_e = 0,8$ mm i odcinka pomiarowego $l_p = 4,8$ mm. Profilogramy powierzchni wykonano przy powiększeniu poziomym $50\times$ oraz powiększeniu pionowym $5000\times$.

3. WYNIKI BADAŃ

Przedstawione na rysunku 5 wyniki badań wpływu promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n i posuwu na parametry chropowatości obrobionej powierzchni pokazują, że w stosowanych warunkach skośnego skrawania chropowatość obrobionej powierzchni ulega znacznym zmianom. Średnie odchylenie profilu chropowatości od linii

średniej R_a zmieniało się w granicach od 0,31 do 1,97 μm , wysokość chropowatości R_z zawierała się w przedziale od 1,63 do 6,97 μm oraz maksymalna wysokość nierówności R_m od 1,93 do 10,26 μm .

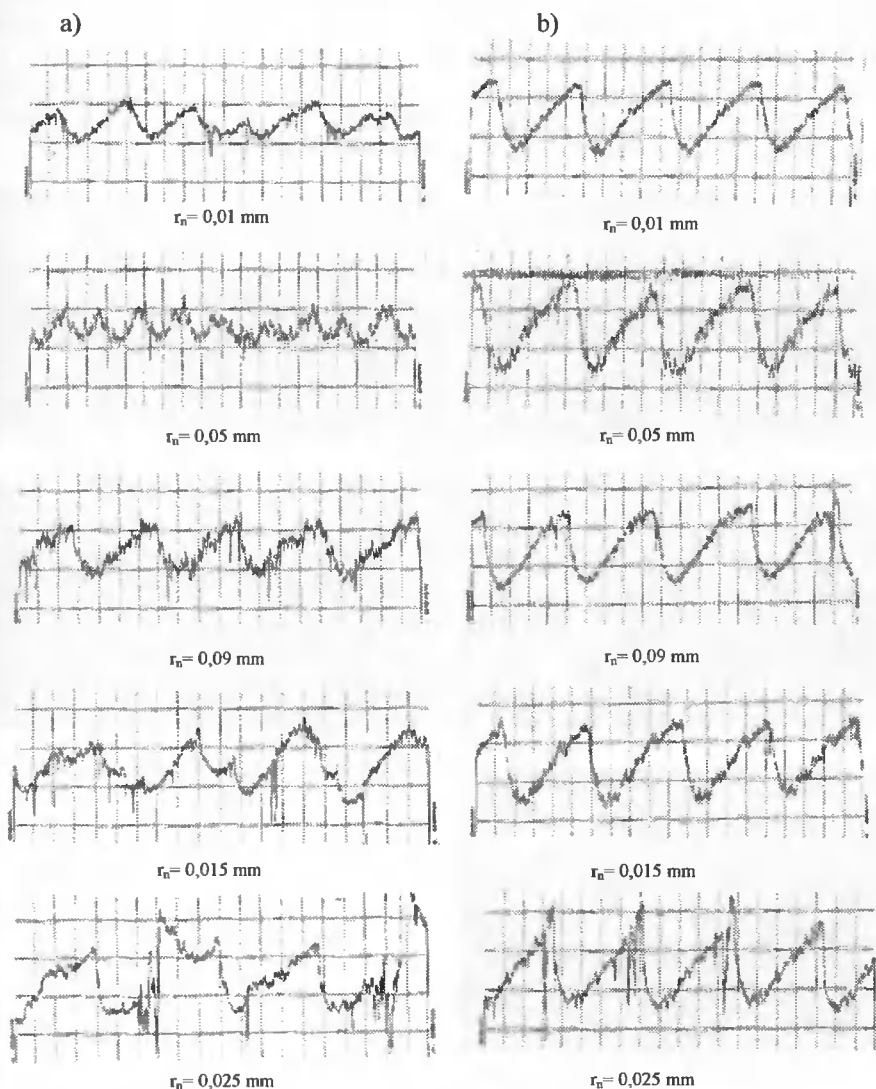


Rys. 5. Zależność parametrów R_m , R_a , R_z od promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n i posuwu dla głębokości skrawania: a) $a_p = 0,3$ i b) $a_p = 0,5$ mm; $\lambda_s = 60^\circ$

Wykresy zależności parametru R_a od promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej wskazują na jego liniowy wzrost w zakresie posuwów 0,105 i 0,262 mm/obr. Dla pozostałych większych posuwów krzywe posiadają w miarę płaskie charakterystyki, przy czym istotny wpływ na wartość parametru R_a ma posuw skrawania. Większe wartości parametru R_a dla promienia zaokrąglenia $r_n = 0,25$ mm dla posuwów $f = 0,105$ i 0,262 mm/obr., które przewyższyły wartości R_a dla posuwów większych, można tłumaczyć pojawianiem się wzmoczonych drgań układu OUPN pojawiających się szczególnie przy posuwie 0,105 mm/obr.

Zależności parametrów R_m i R_z w funkcji promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej mają podobny przebieg. Widoczny jest wpływ posuwu na zmiany parametrów R_z i R_m , jego wzrost wywołuje zwiększenie chropowatości powierzchni. Zastanawiający

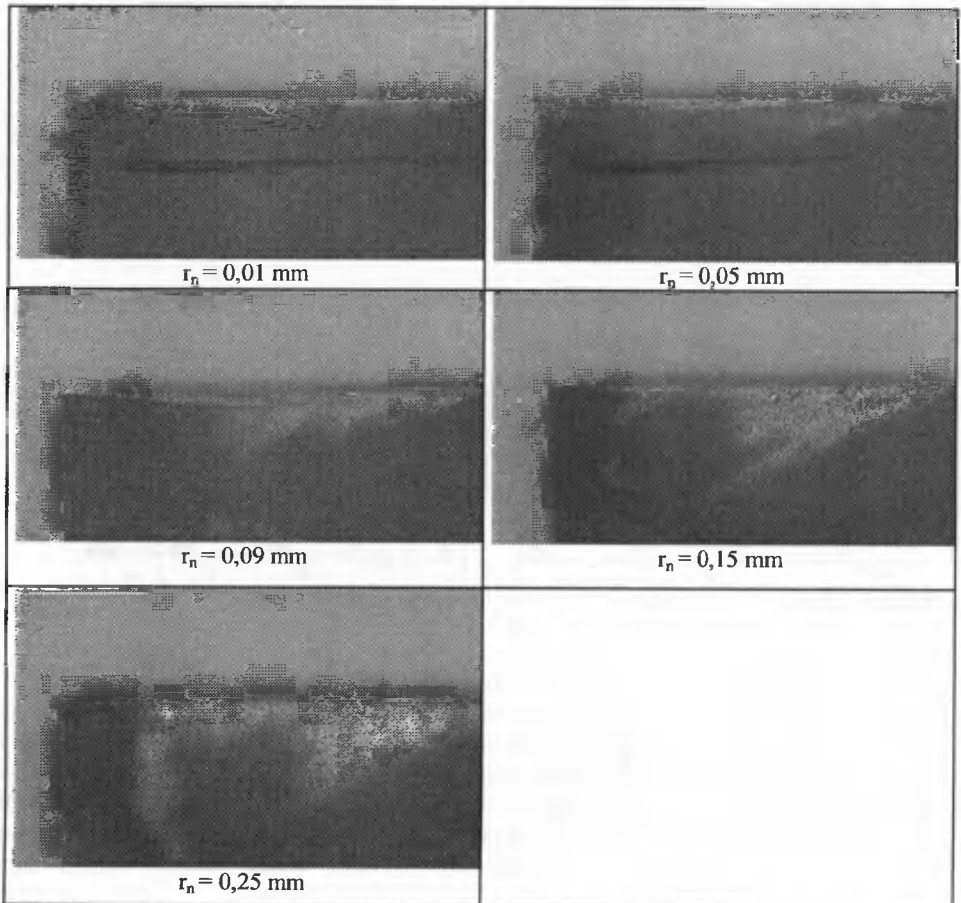
jest fakt zmniejszania się R_z i R_m przy posuwach 0,736 i 0,945 mm/obr. dla promieni zaokrąglenia $r_n = 0,09$ i 0,15 mm. Można przypuszczać, że dla tych ustawień proces skrawania stawał się bardziej stabilny. Niemniej wartości parametrów chropowatości zależą w głównej mierze od promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n , na co wskazuje usytuowanie poszczególnych krzywych. Szczególną uwagę na rozpatrywanych wykresach zwracają osiągnięte wartości parametrów R_m i R_z , odnoszące się do promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej $r_n = 0,25$ mm. Przyczyną wzrostu ich wartości może być zmniejszona stabilność procesu skrawania wywołana ujemnym kątem natarcia w układzie roboczym oraz sprzyjające warunki dla powstawania narostu na powierzchni natarcia.



Rys. 6. Profilogramy powierzchni po obróbce stopu aluminium PA6TA, $v_c = 250$ m/min, $a_p = 0,3$ mm, a) $f = 0,105$ mm/obr.; b) $f = 0,945$ mm/obr. (powiększenie poziome 50x, pionowe 5000x)

Analiza profilogramów obrobionych powierzchni (rys. 6) potwierdza istotny wpływ promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej i posuwu na chropowatość powierzchni. Wzrost wartości promienia powoduje, poza wzrostem amplitudy nierówności, wzrost mikronierówności, zwiększając niejednorodność powierzchni, co wskazuje na zmianę warunków powstawania i spływu wióra oraz zwiększenie dynamiczności procesu skrawania. Występujące korelacje między zaokrągleniem krawędzi skrawającej a chropowatością powierzchni oraz towarzyszące im zjawiska wymagają dalszych badań w celu pełniejszego poznania wpływu geometrii krawędzi skrawającej na jakość obrobionej powierzchni przy skośnym skrawaniu.

Rysunek 7 przedstawia widoki powierzchni natarcia płytek skrawających po toczeniu aluminium, na których widoczne są ślady tarcia wióra o te powierzchnie. Wielkość starcia, związana z długością styku wióra z powierzchnią natarcia, zwiększa się wraz ze wzrostem promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej. Zaobserwowano, że wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n powodował zwiększenie odkształceń materiału obrabianego oraz spęczenia wióra, co przejawiało się trudnościami w jego zwijaniu.



Rys. 7. Widoki powierzchni natarcia płytek skrawających po toczeniu aluminium: $v_c = 250$ m/min, $f = 0,3$ mm/obr., $a_p = 0,3$ mm

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wielkość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej w warunkach skośnego skrawania jest elementem geometrycznym narzędzia, wpływającym w istotny sposób na jakość obrobionej powierzchni. Wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej powoduje zmiany geometrycznych parametrów chropowatości powierzchni w powiązaniu ze zmianami warunków powstawania i splywu wióra. Zjawiska występujące na ostrzu noża, związane z promieniem krawędzi skrawającej, nabierają szczególnego znaczenia w przypadku skrawania z minimalną grubością warstwy skrawanej, mającego zastosowanie w obróbkach ultraprecyzyjnej. Bliższe poznanie występujących zależności między ukształtowaniem krawędzi skrawającej a stereometrią powstałej w procesie skrawania powierzchni wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań i analiz skrawania skośnego.

LITERATURA

- [1] Czizow W.N., Liebidiew S.I., 1973. Opriedielienie optimalnowo radiusa skruglenia rieżuszczich kromok twierdosplawnych rieżcow. *Stanki i instrument* 12, 21.
- [2] Darlewski J., 1997. Postępy w modelowaniu procesu skrawaniem. *Mechanik* 8-9, 387-390.
- [3] Jankowiak M., Kawalec M., Król G., 1993. Analityczne określenie minimalnej grubości warstwy skrawanej dla różnych modeli składowych sił skrawania. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 11, Komisja Budowy Maszyn PAN, oddział w Poznaniu.
- [4] Kawalec M., 1996. Toczenie dokładne zahartowanych stali. *Mechanik* 11, 465-468.
- [5] Katalogi oraz materiały informacyjne IOS i firmy Sandvik Baidonit.
- [6] Latoś H., 1994. Stosowanie obrotowych szczotek ściernych do zaokrąglania krawędzi ostrza narzędzi skrawających. XVII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Kraków
- [7] Lubimow W., Oczos K., 1997. Wybrane zagadnienia kształtowania nierówności powierzchni w procesach obróbkowych. *Mechanik* 3, 81-97.
- [8] Musiałek K., Kowal A., Mszolek J., 1994. Ceramiczne ostrza skrawające do toczenia i frezowania produkcji IOS. *Mechanik* 10, 361-367.
- [9] Musiałek K., Nowak D., Fedaczyński A., 1999. Wybrane zagadnienia profilometrii krawędzi skrawających i płaszczyzn ostrza narzędzi do obróbki metali. IV Międzynarodowa Konf. Nauk-Tech. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej - WW '99, organizowanej przez Politechnikę Poznańską, Gorzów Wielkopolski - Lubniewice 1999.
- [10] Poradnik inżyniera - obróbka skrawaniem, 1991. T. 1, WNT Warszawa.
- [11] Romanow W.W., Czizow W.N., 1985. Wybor optimalnowo radiusa skruglenia rieżuszczich kromok instrumenta po jewo procznosti pri prieriwistom rieżanii. *I.W.U.Z. Maszynostrojenie* 3, 116-120.

- [12] Silin R.I., Miasiszczew A.A., Kowalczuk S.S., 1992. Analiz procesa sniatia struzki riezuszczim klinom so skruglieniem. I.W.U.Z. Maszynostrojenie 10-12, 110-113.

EFFECT OF THE CUTTING EDGE RADIUS ON SURFACE ROUGHNESS

Summary

The study presents the effect of the cutting edge radius on the surface roughness as well as shaping and measuring the cutting edge methodology and techniques.

Keywords: turning, cutting edge radius, surface roughness

ANALIZA POTENCJAŁU I POZYCJI STRATEGICZNEJ ELASTYCZNYCH SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

Tadeusz Leppert

Katedra Inżynierii Produkcji,
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz

W artykule przedstawiono próbę zastosowania metod analizy strategicznej do oceny potencjału i pozycji strategicznej elastycznych systemów produkcyjnych (ESP). Przeanalizowano istniejące formy ESP oraz ich możliwości rozwojowe zgodnie z przyjętymi kryteriami.

Słowa kluczowe: elastyczne systemy produkcyjne, analiza strategiczna, SWOT

1. WSTĘP

Postępujące zmiany strukturalne w środowisku gospodarczym wymagają ciągłego rozwoju systemów produkcyjnych zapewniających zdolność szybkiego reagowania na zmieniające się wymagania rynku. Tendencją o stale rosnącym znaczeniu jest coraz szerzej stosowana elastyczna automatyzacja produkcji, wykorzystująca najnowsze rozwiązania techniczne i organizacyjne zapewniające wysoką efektywność funkcjonowania przedsiębiorstwa oraz elastyczność produkcyjną niezbędną do zaspokojenia pojawiających się potrzeb rynku. Rozwój potencjału produkcyjnego z zastosowaniem elastycznych systemów produkcyjnych (ESP), ze względu na wysokie nakłady finansowe potrzebne do ich wdrożenia, eksploatacji i permanentnego rozwoju, powinien wynikać z ogólnej strategii przedsiębiorstwa, ukierunkowanej na postęp technologiczny będący jednym z kluczowych czynników zwiększających konkurencyjność [1, 3, 5, 9]. W ocenie warunków i celowości stosowania określonych rodzajów środków wytwarzania coraz częściej zastosowanie znajdują metody analizy strategicznej [8], które pozwalają w szerszym kontekście określić przydatność i potencjał rozwojowy elastycznych systemów wytwarzania.

2. ANALIZA OTOCZENIA

Ważnym elementem analizy strategicznej jest dogłębna ocena otoczenia badanego systemu produkcyjnego, która powinna stworzyć podstawy dla przyszłych decyzji dotyczących kierunków i celowości modernizacji systemu produkcyjnego w zakresie stosowania najnowszych technologii i rozwiązań organizacyjnych. Znajomość czynników otoczenia wpływających na rozwój i warunki funkcjonowania elastycznych systemów

produkcyjnych ułatwia podjęcie właściwych decyzji dotyczących prac projektowo-wdrożeniowych, jak również umożliwia zidentyfikowanie szans i zagrożeń oraz sformułowanie strategii opartych na rozwoju technologicznym.

Tabela 1. Wpływ czynników makrootoczenia, otoczenia konkurencyjnego oraz sytuacji wewnętrznej przedsiębiorstwa na rozwój i celowość wdrożenia elastycznych systemów produkcyjnych

| Rodzaj czynnika | Wpływ czynnika | | | |
|---|----------------|---|---|----|
| | ++ | + | - | -- |
| I | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Makrootoczenie | | | | |
| Ekonomiczne | | | | |
| ◆ koniunktura ekonomiczna kraju | X | | | |
| ◆ inflacja | | | | X |
| ◆ dostępność i oprocentowanie kredytów | X | | | |
| ◆ wzrost bezrobocia | | | X | |
| ◆ wzrost zatrudnienia i płac | | X | | |
| ◆ nasycenie rynku | | | | X |
| Prawne i polityczne | | | | |
| ◆ proinwestycyjna polityka państwa | X | | | |
| ◆ obciążenia fiskalne | | | X | |
| ◆ regulacje związane z ochroną środowiska | | X | | |
| ◆ ograniczenia w handlu zagranicznym | | | | X |
| ◆ system ulg i zachęt inwestycyjnych | X | | | |
| ◆ stabilizacja gospodarcza | X | | | |
| Społeczne | | | | |
| ◆ styl życia, zmiany postaw wobec pracy | | X | | |
| ◆ wzrost oczekiwań dotyczących warunków pracy i rozwoju zawodowego | | X | | |
| ◆ wzrost populacji ludności | | | X | |
| ◆ dostępność wysoko wykwalifikowanej kadry technicznej i menedżerskiej | X | | | |
| ◆ presja związków zawodowych na utrzymanie zatrudnienia | | | X | |
| Naturalne | | | | |
| ◆ zanieczyszczenie środowiska | | | X | |
| ◆ dostępność surowców | | X | | |
| Technologiczne | | | | |
| ◆ nakłady przeznaczane na B+R przez przedsiębiorstwa i instytucje państwowe | X | | | |
| ◆ koncentracja na problemach rozwoju technologicznego i organizacyjnego | X | | | |
| ◆ ochrona patentowa | | X | | |
| ◆ bariery transferu technologii | | | | X |
| ◆ skracanie cyklu życia produktów | | X | | |
| ◆ infrastruktura informatyczno-komunikacyjna | | X | | |
| ◆ poziom techniczny, jakość, cena maszyn i urządzeń produkcyjnych | X | | | |

| Otoczenie konkurencyjne | | | | |
|--|---|---|---|--|
| Dostawcy | | | | |
| ◆ możliwości techniczne i produkcyjne dostawców półwyrobów, materiałów paliw i energii | | X | | |
| ◆ wzrost cen zaopatrzeniowych | | | X | |
| ◆ jakość i nowoczesność materiałów, półwyrobów i wyrobów | X | | | |
| ◆ krótki czas i terminowość dostaw | | X | | |
| ◆ pozycja finansowa i przetargowa | | | X | |
| Odbiorcy | | | | |
| ◆ wymagania dywersyfikacji wyrobów | X | | | |
| ◆ wzrost popytu | | X | | |
| ◆ wzrost cen | | | X | |
| ◆ rynki zbytu i kanały dystrybucji | X | | | |
| ◆ zaplecze serwisowe | | X | | |
| ◆ pozycja finansowa i przetargowa | | | X | |
| Substytuty | | | | |
| ◆ nowe rozwiązania konstrukcyjno-technologiczne | | X | | |
| ◆ nowe wdrożenia technologiczne | | X | | |
| Konkurenci | | | | |
| ◆ poziom automatyzacji i robotyzacji | | X | | |
| ◆ poziom zaawansowania technologicznego | | X | | |
| ◆ infrastruktura informatyczna | | X | | |
| ◆ innowacyjność, potencjał badawczy B+R | X | | | |
| ◆ jakość wyrobów | X | | | |
| ◆ koszty produkcji | | X | | |
| ◆ elastyczność na zmianę popytu | X | | | |
| ◆ potencjał finansowy | | X | | |
| ◆ poziom kadry technicznej i kierowniczej | | X | | |
| Wewnętrzna sytuacja w firmie | | | | |
| Personel | | | | |
| ◆ kwalifikacje personelu technicznego | X | | | |
| ◆ kadra zarządzająca | X | | | |
| Organizacja i zarządzanie | | | | |
| ◆ strategia ukierunkowana na wzrost konkurencyjności | X | | | |
| ◆ elastyczność struktur i form zarządzania produkcją | | X | | |
| ◆ organizacja zaopatrzenia i gospodarki materiałowej | | X | | |
| ◆ system jakości | | X | | |
| Technologia | | | | |
| ◆ prowadzenie prac B+R | X | | | |
| ◆ fazy życia stosowanych technologii | | X | | |
| ◆ podzielność i kompatybilność technologii | X | | | |
| ◆ nowoczesność wyposażenia produkcyjnego | X | | | |
| ◆ istniejąca infrastruktura informacyjno-komunikacyjna | | X | | |
| ◆ gotowość do wprowadzania innowacji | X | | | |
| ◆ doświadczenie w projektowaniu i eksploatacji ESP | X | | | |
| Pozycja finansowa | | | | |
| ◆ potencjał finansowy | X | | | |
| ◆ rentowność produkcji | | X | | |
| ◆ zapasy materiałowe, półwyrobów, wyrobów gotowych | | | X | |

| | | | | |
|--|---|---|--|--|
| Marketing | | | | |
| ◆ protechnologiczna strategia marketingowa | X | | | |
| ◆ nowoczesne techniki marketingowe | | X | | |
| ◆ organizacja zbytu i obsługi serwisowej | | X | | |

Otoczenie systemu produkcyjnego dla potrzeb analizy strategicznej można podzielić na: otoczenie pierwszego stopnia (bliższe), związane z sytuacją wewnętrzną w firmie oraz drugiego stopnia (dalsze), wpływające na możliwości i warunki działania przedsiębiorstwa, w którym dany system ma być wdrożony oraz będzie funkcjonować, czyli makrootoczenie i otoczenie konkurencyjne [2, 6, 8].

Jedną z metod jakościowej analizy warunków sprzyjających i niesprzyjających rozwojowi elastycznych systemów produkcyjnych oraz uzasadniających ich wdrożenie i zapewniających efektywną ich eksploatację jest metoda oceny profilu otoczenia, będąca odmianą metod scenariuszowych [7, 9].

Przedstawiona w tabeli 1 próba oceny jakościowej ważności czynników sprzyjających (+) i niesprzyjających (-) rozwojowi elastycznych systemów produkcyjnych wskazuje, że w otoczeniu dalszym do grupy czynników korzystnych zaliczyć należy uwarunkowania związane ze wzrostową koniunkturą i polityką gospodarczą kraju oraz z poziomem rozwoju technicznego i działaniami wspierającymi postęp i innowacyjność produkcji. Negatywnie na rozwój elastycznych form produkcji wpływają stagnacja lub regres gospodarczy, ograniczenia lub bariery w przepływie technologii i know-how oraz niesprzyjające warunki w zakresie rozwoju postępu technicznego.

Analiza otoczenia konkurencyjnego wskazuje na duże znaczenie czynników związanych z wymaganiami rynku odbiorców gotowych wyrobów, ich pozycją finansową, oczekiwaniami odnośnie terminów dostaw, serwisu oraz zaopatrzenia w części zamienne. Również istotne znaczenie na możliwość budowy i rozbudowy ESP mają dostawcy urządzeń produkcyjnych, wyposażenia systemów sterujących i materiałów. Tym niemniej, szczególny wpływ wywierają potencjalni konkurenci w branży, ich cele i strategię w zakresie innowacji, rozwoju technologicznego i marketingu, posiadany potencjał badawczy i prowadzone prace badawczo-rozwojowe, które sprzyjają wdrażaniu nowych rozwiązań produkcyjnych. Zasadnicze znaczenie ma jakość wytwarzanych wyrobów, koszty produkcji, elastyczność na zmiany popytu, sytuacja techniczno-organizacyjna, finansowa i kadrowa.

Spośród czynników związanych z sytuacją wewnętrzną firmy, wpływających na organizację systemu produkcyjnego oraz jego wyposażenie techniczne i informatyczne istotne znaczenie, mają strategia rozwoju firmy, potencjał finansowy, kwalifikacje personelu technicznego i zarządzającego, potencjał technologiczny oraz organizacja i stosowane metody zarządzania przedsiębiorstwem.

Analizując wymienione czynniki można stwierdzić, że nawet w sprzyjających warunkach otoczenia zewnętrznego firmy, o celowości i skuteczności wdrożenia, a w dalszej kolejności efektywnej eksploatacji elastycznych systemów produkcyjnych decyduje sytuacja wewnętrzna firmy. Do najważniejszych zaliczyć należy wizję i strategię rozwoju ukierunkowaną na wzrost konkurencyjności technologicznej. Ponadto, potencjał technologiczny i badawczo-rozwojowy oraz przygotowanie personelu technicznego do wdrożenia i utrzymania w gotowości produkcyjnej systemu. Osiągnięcie zamierzonych efektów wynikających z zastosowania elastycznej automatyzacji i zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych wymaga sprawnego działania infrastruktury informatyczno-

zarządzającej oraz dużego potencjału i zasilania finansowego na bieżącą eksploatację i rozbudowę systemu produkcyjnego.

3. POTENCJAŁ STRATEGICZNY

Elastyczne systemy produkcyjne w zależności od produkowanego asortymentu wyrobów i wielkości produkcji dzieli się na:

- stanowiska produkcyjne sterowane numerycznie (SP/NC),
- stanowiska produkcyjne sterowane komputerowo (SP/CNC),
- autonomiczne stacje produkcyjne (ASP): spaletyzowane (ASP/P) i zrobotyzowane (ASP/R),
- elastyczne gniazda produkcyjne (EGP): spaletyzowane EGP/P i zrobotyzowane EGP/R,
- elastyczne linie produkcyjne (ELP),
- elastyczne wydziały produkcyjne (EWP),
- elastyczne zakłady produkcyjne (EZP).

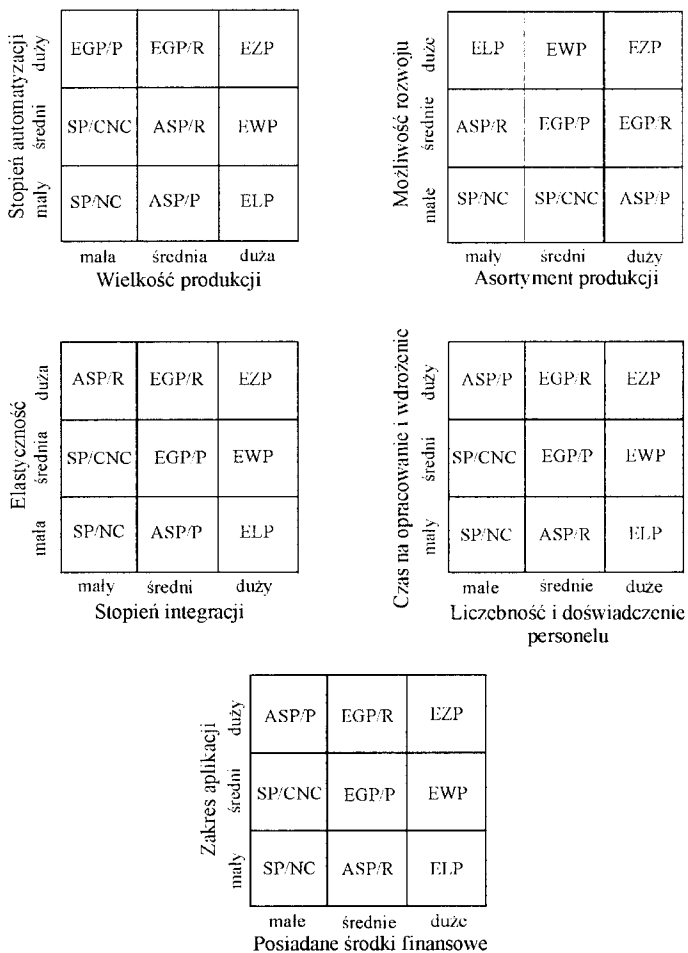
Podstawowymi maszynami technologicznymi stanowisk produkcyjnych są centra obróbkowe lub inne urządzenia sterowane numerycznie NC lub CNC. Uzupełnione w systemy zasilania materiałowego w postaci za- i wyładowczych spaletyzowanych stanowisk lub robotów przemysłowych stanowią konfiguracje autonomicznych jedno lub wielostanowiskowych autonomicznych stacji produkcyjnych (ASP), przeznaczonych do produkcji jednostkowej lub małoseryjnej różnorodnego, ograniczonego zbioru wyrobów. Rozwinięciem autonomicznych stacji produkcyjnych są elastyczne gniazda produkcyjne (EGP), składające z większej ich liczby, charakteryzujące się większą elastycznością i możliwością wytwarzania bogatego zbioru wyrobów w produkcji średnioseryjnej i seryjnej. Wchodzące w skład gniazda stacje produkcyjne mogą być przeznaczone do tych samych lub różnych technologii wytwarzania. Do wytwarzania wyrobów o mniejszej różnorodności i o większej seryjności produkcji stosowane są elastyczne linie produkcyjne (ELP), składające się z elastycznych stacji lub gniazd produkcyjnych zlokalizowanych w określonym porządku wynikającym z kolejności operacji procesu technologicznego. Konsekwencją integracji komputerowej maszyn i urządzeń wchodzących w skład elastycznych systemów produkcyjnych są elastyczne wydziały (EWP) i zakłady produkcyjne (EZP) [1, 3, 4].

W analizie potencjału strategicznego systemów produkcyjnych dużą przydatność wykazują metody analizy portfelowej przydatne w ocenie perspektyw rozwojowych oraz metoda SWOT stosowana w badaniach atrakcyjności i potencjału strategicznego [2, 6, 7].

Przeprowadzona, metodą analizy portfelowej, analiza porównawcza potencjału produkcyjnego rozpatrywanych rodzajów elastycznych systemów produkcyjnych wskazuje na istnienie trzech grup systemów produkcyjnych o podobnej, ze względu na przyjęte kryteria oceny, atrakcyjności i potencjale strategicznym (rys. 1).

Do pierwszej grupy o wysokiej atrakcyjności i wysokim oraz średnim potencjale produkcyjnym zaliczyć można elastyczne zrobotyzowane gniazda produkcyjne (EGP/R) oraz elastyczne wydziały i zakłady produkcyjne (EWP, EZP). Są to systemy o najwyższym stopniu automatyzacji, możliwościach rozwojowych i elastyczności, wymagające dużych nakładów inwestycyjnych, licznego i wysoko wykwalifikowanego personelu techniczno-zarządzającego. Ponadto, ze względu na wysoki stopień złożoności konfigu-

racji i integracji systemu, obarczone są największym ryzykiem i dlatego ich zastosowanie praktyczne dotąd jest ograniczone.



Rys. 1. Potencjał strategiczny elastycznych systemów produkcyjnych

Do drugiej grupy należą systemy leżące na przekątnej macierzy portfela (ASP/P/R, EGP/P/R, ELP). Są to systemy w pełni spełniające kryteria elastycznej automatyzacji produkcji, o znacznym potencjale konkurencyjnym, będące często celem rozbudowy pojedynczych stanowisk produkcyjnych.

Trzecią grupę stanowią pojedyncze stanowiska produkcyjne (SP/NC, SP/CNC, ASP/P/R). Stanowiska te są elementem składowym poprzednio wymienionych systemów. Za wyjątkiem stanowisk wyposażonych w systemy sterowania NC, których rozwój zakończył się wraz z wprowadzeniem sterowania CNC, osiągnęły one znaczny stopień rozwoju i sprawności technicznej. Wykazują szczególną atrakcyjność w początkowym etapie rozwoju automatyzacji elastycznej oraz wymagają dogłębnej analizy techniczno-ekonomicznej ze względu na możliwości dalszej ich rozbudowy.

Decyzje związane z zastosowaniem elastycznych systemów produkcyjnych obarczone są dużym ryzykiem wynikającym ze stopnia złożoności systemów, niepewności odnośnie mogących wystąpić problemów w czasie realizacji inwestycji oraz zakłóceń produkcyjnych, jak również możliwych skutków technicznych, ekonomicznych i organizacyjnych, a także dotyczących dalszego rozwoju systemu. Ocenę ryzyka związanego ze stosowaniem elastycznych systemów produkcyjnych na podstawie analizy szans i zagrożeń jakie niesie wdrożenie ESP oraz mocnych i słabych stron systemów elastycznej produkcji przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Atrakcyjność i potencjał strategiczny elastycznych systemów produkcyjnych w oparciu o analizę SWOT

| Szanse | Zagrożenia |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • wzrost konkurencyjności przedsiębiorstwa • dywersyfikacja produkcji • wzrost zysku • zmniejszenie kosztów • wyższa produktywność zaangażowanego kapitału • elastyczność w stosunku do odbiorców • jakość produkcji • automatyzacja produkcji mała, średniose-ryjnej • atrakcyjność stanowisk pracy • możliwość rozbudowy systemu produkcyjnego • modernizacja i rozwój technologii wytwarzania • możliwość integracji funkcji przedsiębiorstwa | <ul style="list-style-type: none"> • wystąpienie problemów i opóźnień wdrożeniowych • przekroczenie założonych kosztów i czasu inwestycji • ryzyko powodzenia inwestycji i zwrotu poniesionych nakładów • liczba alternatywnych technologii • zmienność faz cyklu technologii • zależność wielkości efektów od kwalifikacji i postawy pracowników • poziom gotowości produkcyjnej systemu • awaryjność systemu • trudności eksploatacyjne dużych systemów • pracochłonność i złożoność przygotowania produkcji (CAD, CAPP, CAM, CIM) • częste zmiany profilu produkcyjnego |
| Mocne strony | Słabe strony |
| <ul style="list-style-type: none"> • elastyczność urządzeń i struktur organizacyjnych • automatyzacja przygotowania, wytwarzania i sterowania procesem produkcyjnym • integracja systemu produkcyjnego • modułowa budowa • zmniejszenie zatrudnienia • zmniejszenie powierzchni produkcyjnej • zmniejszenie liczby stanowisk produkcyjnych • normalizacja i typizacja urządzeń i wyposażenia systemu (hardware) | <ul style="list-style-type: none"> • koszt opracowania projektu inwestycyjnego i wdrożenia • koszt urządzeń i wyposażenia (hardware) • koszt infrastruktury informatycznej i oprogramowania • koszt eksploatacji i utrzymania eksploatacyjnego • stopień skomplikowania systemu • wysokie kwalifikacje obsługi |

Do najważniejszych korzyści wynikających z wdrożenia ESP zaliczyć należy wzrost konkurencji przedsiębiorstwa związany z możliwością dywersyfikacji produkcji, obniżenia kosztów produkcji, dostosowania się do wymagań odbiorców. Zagrożeniem dla osiągnięcia wymienionych efektów mogą być opóźnienia w procesie realizacji projektu inwestycyjnego spowodowane problemami zarówno o charakterze technicznym,

jak i finansowym, pojawienie się nowych alternatywnych technologii lub wyrobów oraz trudności eksploatacyjne obniżające efektywność systemu.

Mocną stroną ESP jest ich elastyczność produkcyjna wynikająca z elastyczności urządzeń i struktur organizacyjnych. Wysoki poziom standaryzacji i typizacji urządzeń składowych oraz modułowa budowa umożliwiają ich rozbudowę stosownie do potrzeb produkcyjnych. Do niewątpliwie słabych stron ESP należą wysokie koszty związane z opracowaniem projektu systemu, jego wdrożenia i obsługi. Ponadto wraz z pogłębianiem się złożoności systemu rosną wymagania odnośnie kwalifikacji personelu inżynierskiego i obsługi.

4. POZYCJA STRATEGICZNA

Pozycję strategiczną elastycznych systemów produkcyjnych w warunkach zwiększających się wymagań rynku wyznacza ich atrakcyjność konkurencyjna, wyrażona przez korzyści wynikające z ich zastosowania oraz zawarty w nich potencjał produkcyjny i rozwojowy

Przedstawiona na rysunku 2 macierz klasyfikuje poszczególne rodzaje ESP ze względu na ich atrakcyjność wynikającą z szans i zagrożeń oraz tkwiący w nich potencjał produkcyjny wyrażający się w mocnych i słabych stronach analizowanych systemów produkcyjnych. Najmniejszą atrakcyjnością i potencjałem charakteryzują się pojedyncze stanowiska produkcyjne (SP/NC i SP/CNC).

| | | | |
|----------------------------|------------|-----------------------|--------------------|
| Atrakcyjność przeciętna | duża | EGP/R/P | EZP EWP ELP |
| | przeciętna | SP/CNC | EGP/P/R ASP/P/R |
| | | przeciętny | duży |
| | | Potencjał produkcyjny | |

Rys. 2. Pozycja strategiczna elastycznych systemów produkcyjnych

Stanowiska te wchodziły w skład pozostałych rodzajów ESP i dalszy ich rozwój związany jest z postępowaniem w zakresie ich możliwości technologicznych. Grupą ESP o większych możliwościach produkcyjnych, zapewniających jednocześnie korzyści wynikające z elastycznej automatyzacji są autonomiczne stacje produkcyjne ASP/P i ASP/R. Posiadają one istotne możliwości rozwojowe. Najbardziej atrakcyjną grupą o znacznym potencjale mocnych stron są elastyczne gniazda produkcyjne (EGP/P i EGP/R) oraz elastyczne linie produkcyjne (ELP). Spełniają one wszystkie cechy elastycznej automatyzacji i w zależności od zakresu integracji stanowią podstawę komputerowo zintegrowanych systemów produkcyjnych (CIM). Nieliczną obecnie grupę ESP o największych w przyszłości możliwościach rozwoju stanowią elastyczne wydziały i zakłady produkcyjne. Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że w zakładach, w których wdrożono tego rodzaju systemy, w wielu przypadkach nie przyniosły one zakładanych efektów, co wiązało się ze znacznymi trudnościami w zapewnieniu wymaganej elastyczności systemu oraz wysokimi

kosztami zarządzania i eksploatacji [1,4,5]. Dalszy rozwój integracji systemów produkcyjnych uzależniony jest w znacznym stopniu od postępu w zakresie systemów sterowania i komunikacji, pozwalających na decentralizację zarządzania systemem produkcyjnym, co umożliwi uproszczenie złożonych programów sterujących.

5. WNIOSKI

Przedstawione metody analizy strategicznej stanowią zestaw użytecznych narzędzi, pozwalających na wszechstronną ocenę strategiczną systemów produkcyjnych. Prowadzone z ich zastosowaniem analizy uwzględniają różne uwarunkowania wpływające na celowość wdrażania i rozwoju systemów produkcyjnych, a także stwarzają podstawy do podjęcia bardziej trafnych decyzji inwestycyjnych i produkcyjnych, uwzględniających zarówno aspekty techniczne, organizacyjne, społeczne, jak i ekonomiczne wynikające z oddziaływań otoczenia. Dokonana analiza pozwoliła określić pozycję i potencjał strategiczny opisanych odmian elastycznych systemów produkcyjnych.

LITERATURA

- [1] Denis F., 1985. Managing our way to 'a factory with the future'. Proceedings of the 3rd European conference on Automated Manufacturing, May, Birmingham, UK.
- [2] Gierszewska G., Romanowska M., 1995. Analiza strategiczna przedsiębiorstwa. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- [3] Horczyczak M., 1996. Kierunki rozwoju elastycznych systemów produkcyjnych. *Ekonomika i organizacja przemysłu* 3.
- [4] Kaśkosz W., 1991. Zastosowanie elastycznych jednostek produkcyjnych (EJP) w przemyśle maszynowym. *Mechanika* 12.
- [5] Lis S., Santarek K., Strzelczak S., 1994. Organizacja elastycznych systemów produkcyjnych. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- [6] Santarek K., Strzelczak S., 1989. Elastyczne systemy produkcyjne. WNT Warszawa.
- [7] Smith G.D., Arnold D.R., Bizzell B.G., 1985. Strategy and business policy. Houghton Mifflin Company, Boston.
- [8] Strategor. Zarządzanie firmą. Strategie. Struktury. Decyzje. Tożsamość. PWE Warszawa.
- [9] Yates R.A., 1985. Strategic management of advanced manufacturing technology. Proceedings of the 3rd European conference on Automated Manufacturing, May, Birmingham, UK.

ANALYSIS OF STRATEGIC POTENTIAL AND POSITION OF FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS

Summary

The article presents an attempt at applying strategic analysis methods to estimate the potential and strategic position of flexible manufacturing systems. The existing forms of flexible manufacturing systems were compared according to the criteria defined and their development potential was determined.

Keywords: Flexible Manufacturing Systems, strategic analysis, SWOT

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODZENIA CIEPŁA W WARUNKACH LABORATORYJNYCH

Jan Łukasiewicz, Marek Szymczak

Katedra Techniki Ciepłej i Metrologii

Wydział Mechaniczny ATR

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

W artykule przedstawiono niektóre problemy wyznaczania wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ w warunkach laboratoryjnych. Zaprezentowano aparaturę i sposoby prowadzenia badań przewodności cieplnej cieczy, gazów i ciał stałych.

Słowa kluczowe: przewodność cieplna, współczynnik przewodzenia ciepła

1. WSTĘP

Przewodzenie ciepła to zjawisko zachodzące w ośrodkach materialnych, opisane w teorii równaniem Fouriera. Zgodnie z tym równaniem, przez przekrój izotermiczny F w odstępie czasu dt przewodzone jest ciepło dQ . W uproszczonym przypadku, gdy można przyjąć, że przepływ ciepła ma charakter ustalony, a ilość wymienianego ciepła jest stała w jednostce czasu, równanie Fouriera można zapisać w postaci:

$$Q = \lambda \cdot \tau \cdot F \cdot \frac{t_1 - t_2}{\delta} \quad (1)$$

W równaniu tym t_1 i t_2 oznaczają stałe temperatury w przekrojach izotermicznych wyodrębnionych w obszarze ośrodka materialnego, δ - określa odległość między przekrojami, τ - czas, a Q - ilość wymienionego ciepła przez przewodzenie. Jeżeli przyjmie się, że droga przewodzenia ciepła $\delta = 1$ m, $t_1 - t_2 = 1$ K, powierzchnia $F = 1$ m², a czas $\tau = 1$ s, wówczas z równania 1 wynika, że $Q = \lambda$. Współczynnik przewodzenia ciepła λ w równaniu Fouriera, a tym samym w wyznaczaniu ilości ciepła wymienianego przez przewodzenie spełnia zatem bardzo istotną funkcję. Jeżeli wymiana ciepła zachodzi w ośrodkach ciągłych i jednorodnych, wówczas równanie Fouriera po modyfikacji przedstawić można w postaci:

$$Q = - \lambda \cdot \text{grad } T \quad (2)$$

Z równania tego wynika, że gęstość strumienia ciepła Q wyrażona w $\frac{J}{m^2 \cdot s}$ lub w $\frac{W}{m \cdot K}$ przewodzonego w rozpatrywanym materialnym ośrodku zależy wprost proporcjonalnie od wartości λ i gradientu temperatury. Znak poprzedzający równanie uwzględnia fakt, że kierunek przepływu ciepła jest przeciwny do gradientu temperatury. Współczynnik proporcjonalności λ jest cechą ośrodka materialnego przewodzącego ciepło, określa jego właściwości cieplne, a jego wartość zależy od temperatury, wilgotności i budowy strukturalnej.

Wyznaczone doświadczalnie wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ dla gazów rzeczywistych wahają się w granicach od $0,006 \div 0,6 \frac{W}{m \cdot K}$. Jeśli gaz jest mieszaniną wieloskładnikową, współczynnik ten obliczyć można teoretycznie korzystając z zależności:

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \lambda_i \quad (3)$$

gdzie:

- λ_i - współczynnik przewodności cieplnej składnika mieszaniny,
- r_i - udział masowy składnika mieszaniny.

Przewodność cieplna wilgotnych gazów zależy w znacznej mierze od zawartości w nich wilgoci w postaci pary wodnej. Wartość przewodności cieplnej wilgotnego powietrza określa zależność:

$$\lambda_{wp} = \frac{\lambda_p + x\lambda_w}{1 + x} \quad (4)$$

gdzie:

- λ_p - przewodność cieplna suchego powietrza,
- λ_w - przewodność cieplna wody,
- x - wilgotność właściwa powietrza.

Wartości przewodności cieplnej λ dla cieczy - z wyjątkiem metali ciekłych - wynoszą od $0,09 \div 0,7$, dla materiałów izolacyjnych stosowanych w budownictwie w granicach od $0,02 \div 3,0$, a metale mają wartość λ zawartą w granicach od $40 \div 400 \frac{W}{m \cdot K}$ [1].

Dla często stosowanych w technice gazów, cieczy i materiałów stałych wartości współczynnika λ są znane i podawane w literaturze.

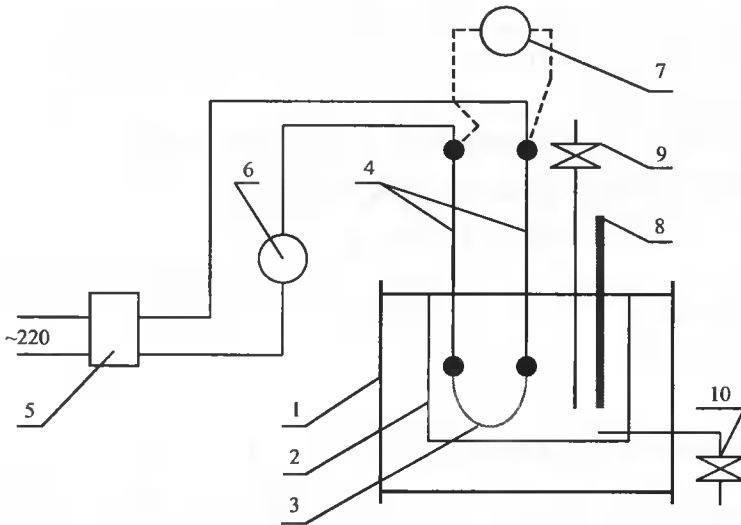
Inżynieria materiałowa wciąż dostarcza nowe materiały o różnym przeznaczeniu, strukturze, cechach fizykochemicznych i właściwościach cieplnych. Zachodzi więc konieczność prowadzenia badań laboratoryjnych w celu doświadczalnego określenia ich własności cieplnych. Spełnienie rygorów i wymagań norm określających sposoby prowadzenia badań obliuguje do stosowania izolowanych komór cieplnych wyposażonych w nowoczesną aparaturę i przyrządy pomiarowe o wysokiej klasie dokładności.

Badania przebiegu zmian wartości współczynnika λ prowadzone są w laboratoriach naukowych uczelni technicznych i Instytutach Techniki Ciepłej i Budowlanej w Warszawie, Poznaniu, Olsztynie i innych ośrodkach naukowych, z wykorzystaniem aparatury spełniającej normy ISO. W artykule opisano aparaturę przeznaczoną do wyznaczenia przewodności cieplnej λ dla płynów i materiałów stałych.

2. APARATURA DO BADAŃ WSPÓLCZYNNIKA λ DLA PŁYNÓW

Wyznaczanie współczynnika przewodzenia ciepła cieczy i gazów jest trudne ze względu na specyfikę tych substancji i konieczność zachowania stabilnych warunków w trakcie prowadzonych badań. Urządzenia pomiarowe i aparatura jest projektowana indywidualnie, stosownie do potrzeb.

Zasadę pomiaru przewodności cieplnej płynów przedstawiono na schemacie zamieszczonym na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego do pomiaru współczynnika przewodności cieplnej dielektryków ciekłych i gazowych: 1 - ultratermostat, 2 - pojemnik wypełniony badanym płynem, 3 - element grzewczy, 4 - elektrody, 5 - zasilacz stabilizujący parametry prądu, 6 - miliamperomierz, 7 - woltomierz, 8 - termometr, 9 - zawory do napełniania i opróżniania pojemnika

W badanym płynie umieszczone są elektrody z rozpiętym drucikiem miedzianym lub platynowym. Jest on zasilany prądem o niskim napięciu. Drucik ten powinien mieć tak dobraną średnicę, aby istniała możliwość spełnienia warunku:

$$\text{Gr} \cdot \text{Pr} = \frac{g \cdot \hat{a} \cdot d^3 \cdot \Delta T}{i^2} \cdot \text{Pr} \leq 10^{-3} \quad (5)$$

gdzie:

- Gr - liczba kryterialna Grashofa,
- Pr - liczba kryterialna Prandtla - uwzględniająca własności fizyczne płynu,
- g - przyspieszenie ziemskie,
- β - objętościowy współczynnik rozszerzalności termicznej,
- d - średnica druczika,
- ΔT - różnica temperatury,
- ν - lepkość kinematyczna płynu.

Po załączeniu źródła prądu zmiennego i doprowadzeniu stabilizowanego prądu poprzez elektrody do druczika grzałki nastąpi wymiana ciepła pomiędzy tym elementem o temperaturze T i płynem o temperaturze T_0 . Moc elementu grzejnego jest równa ilości ciepła przejętego przez badany płyn w jednostce czasu:

$$Q = U \cdot I \quad (5)$$

gdzie:

- U - napięcie prądu mierzone miliwoltomierzem,
- I - natężenie prądu zasilającego grzałkę mierzone amperomierzem.

Ponieważ $\Delta T = T - T_0$, a strumień ciepła $q = \frac{Q}{F}$, gdzie F jest powierzchnią normalną do kierunku przepływu ciepła, można więc napisać, że:

$$U \cdot I = \alpha \cdot \Delta T \cdot F \quad (6)$$

Strumień ciepła emitowany przez element grzewczy przejmowany przez płyn obliczyć można z zależności:

$$q = \alpha \cdot (T - T_0) \quad (7)$$

gdzie:

- α - współczynnik przejmowania ciepła.

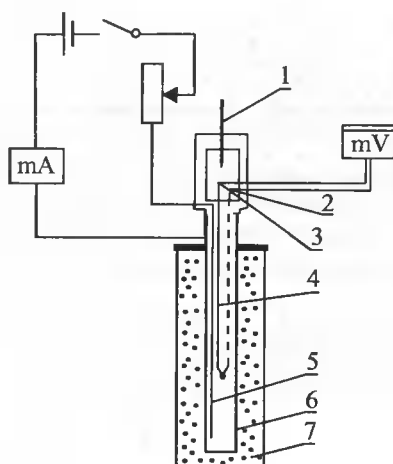
Powierzchnia elementu grzewczego wymieniająca ciepło z płynem jest równa:

$$F = \pi \cdot d \cdot l \quad (8)$$

Po uwzględnieniu, że $\alpha = 0,5 \frac{\lambda}{d}$, co wynika z faktu, że przejmowanie ciepła w warunkach ustalonych dla danej wartości α jest określone jedynie przez przewodność cieplną ośrodka, jej wartość można obliczyć ze wzoru:

$$\lambda = \frac{2 \cdot U \cdot I}{\pi \cdot l \cdot \Delta T} \quad (9)$$

Do wyznaczania wartości współczynników przewodzenia ciepła dla płynów o dużej lepkości w funkcji ich temperatury można wykorzystać aparat przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Aparat do pomiaru przewodności cieplnej metodą sondy cieplnej: 1 - termometr temperatury odniesienia, 2 - blok miedziany termostatujący zimne końce termoelementu, 3 - zimne końce termoelementu, 4 - termoelement, 5 - drut grzejny, 6 - rurka stalowa, 7 - badany materiał

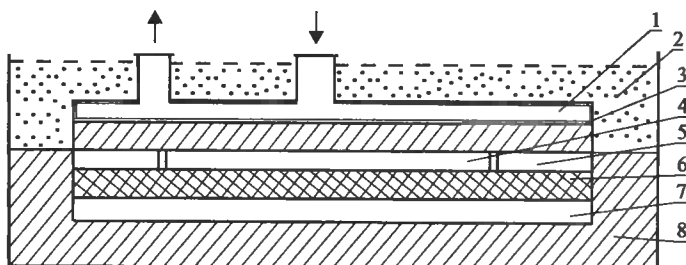
Aparat działa na zasadzie sondy cieplnej z liniowym źródłem ciepła o stałej mocy. Można w nim także badać przewodność cieplną ciał stałych sypkich lub granulowanych.

Przewodność cieplną oblicza się z zależności wynikających z równania Fouriera lub z zależności, w której występuje indywidualna stała wartość K wyznaczona doświadczalnie dla każdego przyrządu i określonego przedziału czasu [2].

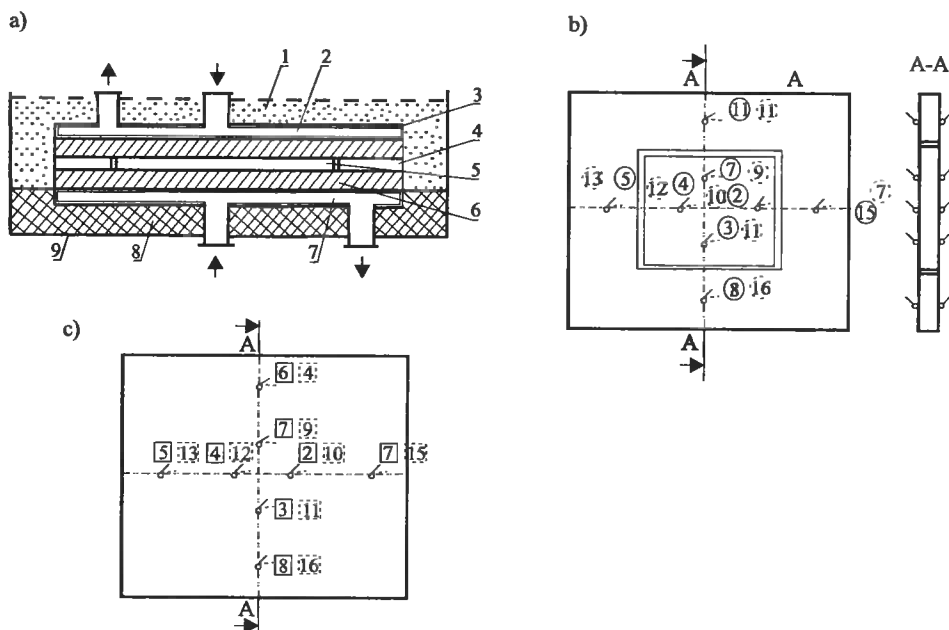
$$\lambda = \frac{K}{T_2 - T_1} \quad (10)$$

3. POMIARY PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ MATERIAŁÓW STAŁYCH, SYPKICH I WŁÓKNISTYCH

Przewodność cieplną materiałów stałych, sypkich lub włóknistych można badać posługując się jednopłytkowym aparatem Poensgena. Jest on zmodyfikowaną wersją aparatu dwupłytkowego. Różni się tym, że jest pozbawiony drugiej badanej próbki i drugiej chłodnicy, które zostały zastąpione dodatkowym grzejnikiem osłonowym (dolnym), zapewniającym eliminację strat ciepła dolnej powierzchni grzejnika głównego. Na rysunku 3 zamieszczono schemat aparatu jednopłytkowego, a na rysunku 4 pokazano aparat dwupłytkowy.



Rys. 3. Jednopłytkowy aparat Poensgena: 1 - chłodnica, 2 - górną izolacją zasypową, 3 - badaną próbką, 4 - grzejnik główny, 5 - grzejnik boczny, 6 - przekładką izolacyjną, 7 - grzejnik osłonowy (dolny), 8 - izolację dolną obudowy



Rys. 4. Dwupłytkowy aparat Poensgena: a) przekrój przez aparat: 1 - górną izolacją zasypową obudowy, 2 - chłodnicą górną, 3 - badaną próbką, 4 - grzejnik zewnętrzny, 5 - grzejnik główny (wewnętrzny), 6 - badaną próbką, 7 - chłodnicą dolną, 8 - dolną izolacją obudowy, 9 - skrzynia zewnętrzna; b) rozmieszczenie punktów pomiaru temperatury na powierzchni grzejników: 1-4 - termoelementy górnej powierzchni grzejnika głównego, 5-8 - termoelementy górnej powierzchni grzejnika bocznego, 9-12 - termoelementy dolnej powierzchni grzejnika głównego, 13-16 - termoelementy dolnej powierzchni grzejnika bocznego; c) rozmieszczenie punktów pomiaru temperatury na powierzchni chłodnic: 1-8 - termoelementy chłodnicy dolnej, 9-16 - termoelementy chłodnicy górnej

Wielkościami mierzonymi podczas badań aparatami Poensgena są:

- ilość ciepła przewodzonego przez próbkę badanego materiału,
- pole powierzchni, przez którą przewodzone jest ciepło (powierzchnia prostopadła do kierunku przepływu strumienia ciepła),
- temperatury na zewnętrznych izotermicznych powierzchniach próbki,
- grubość próbki przewodzącej ciepło.

Spełnienie wymagań wynikających z równania Fouriera, a dotyczących kierunku przepływu ciepła, uzyskano poprzez odpowiednią konstrukcję aparatów i właściwe wykonanie próbek. Grzejnik zewnętrzny kompensuje przepływ ciepła z grzejnika głównego na boki. Podobne zadanie ma izolacja wypełniająca przestrzeń między obudową i elementami głównymi aparatu. Grzejnik zewnętrzny i izolacja obudowy dobrze kompensuje boczny przepływ ciepła pod warunkiem, że grubość badanej próbki jest 2÷3 razy mniejsza od szerokości grzejnika zewnętrznego. Jeżeli przewodność cieplna izolacji obudowy i badanej próbki są tego samego rzędu, to szerokość grzejnika zewnętrznego winna być 7÷10 razy większa od grubości próbki.

Chłodnice wodne powinny zapewnić równomierne odprowadzenie ciepła z całej powierzchni, zapewniając jej izotermiczność. Osiąga się ten efekt dzięki stałej prędkości przepływu i stałej temperaturze wody zasilającej chłodnicę, przy małym wzroście jej temperatury, nie większym niż 1°C. Obydwie chłodnice powinny zapewnić identyczne warunki chłodzenia.

Próbki przygotowane do badań w aparacie powinny mieć taką samą grubość i pochodzić z partii materiału poddawanej analizie własności cieplnych. Grubość próbek winna być co najmniej o rząd wartości większa od nierównomierności struktury materiału np. ziarna.

Uruchomienie aparatu następuje po umieszczeniu próbek w aparacie, sprawdzeniu ich przylegania do chłodnic i grzejników i włączeniu grzejników głównego i bocznego. Moc grzejnika głównego reguluje się odpowiednio do wartości obciążenia cieplnego określonego dla spodziewanej przewodności cieplnej badanego materiału, przy założonej różnicy temperatur. Moc grzejnika bocznego P_b reguluje się odpowiednio do mocy grzejnika głównego P_g , biorąc pod uwagę zależność:

$$P_b = P_g \frac{A_b}{A_g} + \Delta P \quad (11)$$

gdzie:

ΔP - moc dodatkowa wynikająca ze strat bocznych,

A_b, A_g - pola powierzchni grzejnika bocznego i głównego.

Po podgrzaniu się grzejników do temperatury o 2 do 3°C niższej od wartości, przy której można spodziewać się osiągnięcia stanu równowagi, włącza się zasilanie chłodnic, ustawiając równomierne natężenie przepływu w celu uzyskania małego przyrostu temperatury cieczy chłodzącej. Temperaturę cieczy zasilającej chłodnicę nastawia się regulatorem układu zasilania. Włącza się układ rejestracji temperatur. Po upływie określonego czasu, np. pół godziny, na podstawie wstępnego pomiaru temperatury grzejników doregulowuje się moc grzejników, tak aby temperatury na powierzchni grzejników - głównego i bocznego - osiągnęły tę samą wartość. Regulację przeprowadza się kilkakrotnie, aż do osiągnięcia stanu równowagi termicznej, a następnie odczytuje napięcie i natężenie prądu zasilającego grzejnik główny oraz temperaturę grzejników i chłodnicy w głównym okresie pomiarowym. Odczytów należy dokonywać przez okres gwarantujący, że został osiągnięty stan ustalony.

Długość tego okresu zależy od ilości wydzielanego ciepła przez grzejniki, ich pojemności cieplnej, rodzaju oraz dokładności odczytów temperatury. Na podstawie bilansu układu można ustalić długość głównego okresu pomiarowego ze wzoru:

$$\tau > \frac{\Delta T \sum C}{P \left[2 \frac{b_p}{b_t} + (1 - b_p) \right]} \quad (12)$$

gdzie:

ΔT - spadek temperatury na próbce,

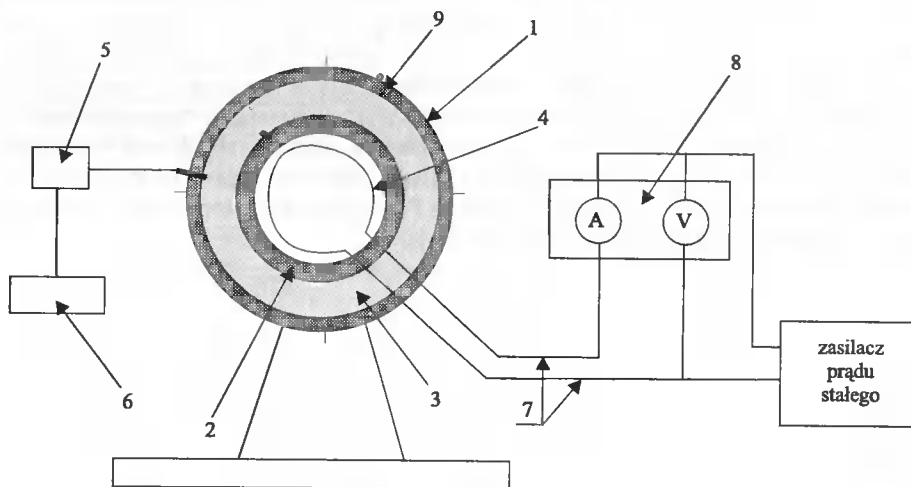
$\sum C$ - suma pojemności cieplnych próbek i grzejników,

P - moc grzejników,

b_t - błąd pomiaru różnicy temperatur,

b_p - błąd stanu równowagi równy błędowi pomiaru mocy grzejników.

W laboratorium termodynamiki na Wydziale Mechanicznym ATR do pomiarów własności cieplnych materiałów sypkich ziarnistych i granulowanych wykorzystywany jest aparat kulowy, schemat którego zamieszczono na rysunku 5.

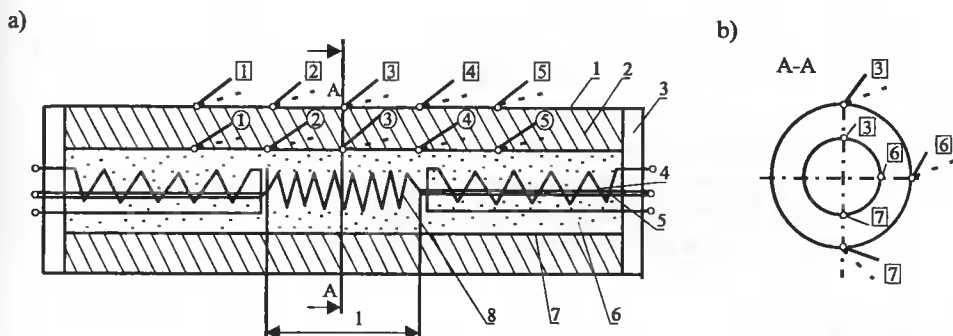


Rys. 5. Aparat kulowy: 1 - kula zewnętrzna, 2 - kula wewnętrzna, 3 - próbka badanego materiału sypkiego, 4 - spirala grzejna, 5 - pojemnik zawierający mieszaninę wody i lodu, 6 - miliwoltomierz, 7 - przewody zasilające spiralę grzejną, 8 - mierniki napięcia i natężenia prądu, 9 - wziernik i pokrywa otworu zasypowego

Spirala grzejna umieszczona we wnętrzu kuli zasilana jest stabilizowanym, stałym prądem z zasilacza. Ciepło generowane przez spiralę grzejną jest regulowane poprzez odpowiednio programowane ustawienie parametrów prądu zasilającego, mierzone woltomierzem i amperomierzem. Na powierzchniach kuli wewnętrznej i zewnętrznej zainstalowano czujniki termometrów termoelektrycznych do ciągłych pomiarów temperatury.

Pomiary przewodności cieplnej materiałów uformowanych o kształcie przystosowanym do izolowania rurociągów wykonuje się w aparatach rurowych. Uzyskane wyniki pomiarów umożliwiają analizę wpływu technologii wykonania oraz układania izolacji na rurociągu na wielkość oporów cieplnych elementów lub całej izolacji.

Aparat schematycznie pokazany na rysunku 6 jest zbudowany z cienkościennej rury o średnicy zewnętrznej odpowiadającej średnicy wewnętrznej badanej izolacji.

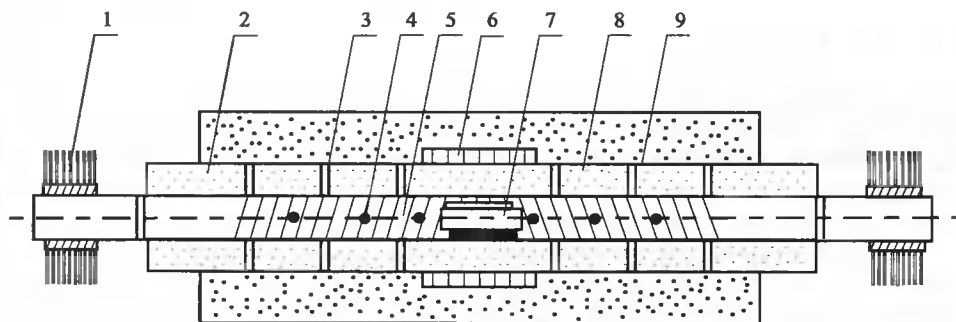


Rys. 6. Aparat rurowy do pomiarów przewodności cieplnej: a) przekrój wzdłużny aparatu; b) przekrój poprzeczny aparatu; 1 - folia osłonowa, 2 - badany materiał izolacyjny, 3 - osłona czołowa, 4 - grzejnik boczny, 5 - ceramiczna rura wyprowadzająca, 6 - wypełnienie ceramiczne rury wewnętrznej, 7 - rura wewnętrzna aparatu, 8 - grzejnik główny

Na rurze umieszczona jest izolacja wielowarstwowa, a końce rury osłonięte są korkami z identycznego materiału. W miejscach pomiaru temperatury warstwa izolacji od zewnątrz jest osłonięta taśmami z folii miedzianej. Spoiny pomiarowe termoelementów rozmieszczone są promieniowo.

Grzejnik aparatu z zamocowaną izolacją zasilany jest prądem o napięciu zapewniającym taką moc cieplną, aby uzyskać żądaną temperaturę wewnętrznej brzegowej powierzchni izolacji.

Aparat Schofielda, rysunek 7 przeznaczony do pomiarów przewodności cieplnej materiałów o dużej wartości współczynnika λ wykorzystuje tzw. absolutną metodę prętową.



Rys. 7. Aparat Schofielda do pomiaru współczynnika przewodności cieplnej: 1 - końcowe chłodnice powietrzne, 2 - druga warstwa izolacji ochronnej, 3 - krążki dystansowe utrzymujące próbkę w osi aparatu - wykonane z drobnych izolatorów, 4 - termoelementy do pomiarów spadków temperatury, 5 - dwuczęściowa próbka z badanego materiału, 6 - pomocniczy grzejnik elektryczny, 7 - główny grzejnik elektryczny - pomiarowe źródło ciepła, 8 - izolacja zasypowa, 9 - rura osłonowa

W środku badanej próbki, składającej się z dwu części, umieszczono grzejnik elektryczny, a na końcach chłodnice. Dodatkowy grzejnik i izolacja chronią próbkę przed promieniowymi stratami ciepła. Przyjmując, że straty boczne są pomijalnie małe, obydwie części próbki identyczne oraz jednakowe temperatury obydwu końców tej próbki, to współczynnik przewodności cieplnej wyznaczyć można z zależności:

$$\lambda = \frac{Q \cdot L}{2A \cdot \Delta T} \quad (13)$$

gdzie:

- L - całkowita długość próbki (obydwu części odcinka pomiarowego),
- A - pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki (części pomiarowej),
- ΔT - spadki temperatury na odcinku pomiarowym,
- Q - moc grzejnika głównego.

4. WNIOSKI

Ruch ciepła teoretycznie opisany równaniami matematycznymi odbywa się na drodze przewodzenia, konwekcji, przenikania i promieniowania. We wzorach ujmujących przebieg przemian termodynamicznych zachodzących w ośrodkach materialnych stałych, cieczech i gazach bardzo ważną funkcję spełnia współczynnik przewodzenia ciepła λ , odzwierciedlający ich własności cieplne. Stwierdzono, że wartość tego współczynnika zależy nie tylko od temperatury, lecz od wielu innych czynników, takich jak budowa strukturalna, skład chemiczny, wilgotność, gęstość itp. Wyznaczanie wartości współczynnika λ wymaga zastosowania specjalistycznej aparatury i spełnienia specyficznych wymogów norm określających przebieg badań cieplnych.

W artykule zaprezentowano laboratoryjną aparaturę przeznaczoną do wyznaczania własności cieplnych płynów, gazów i ciał stałych.

LITERATURA

- [1] Hobler T., 1986. Ruch ciepła i wymienniki. WNT Warszawa.
- [2] Rowiński R., Rubczewski J., 1996. Termodynamika. ART Olsztyn.

DEFINING THERMAL CONDUCTIVITY IN LABORATORY CONDITIONS

Summary

The article covers some of the problems with defining the value of thermal conductivity λ under laboratory conditions. There have been presented apparatuses and liquid, gas and solids thermal conductivity research methods.

Keywords: thermal conductivity

TEORETYCZNE PODSTAWY WYMIAROWANIA MATERIAŁÓW I KONSTRUKCJI Z WYKORZYSTANIEM MECHANIKI PĘKANIA

Eugeniusz Ranatowski

Katedra Materiałoznawstwa i Technologii Metali
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W artykule scharakteryzowano ogólne zasady wymiarowania i podobieństwa materiałów i konstrukcji z formalnego punktu widzenia, wykorzystując podobieństwo modelu i układu rzeczywistego w fizycznej przestrzeni wymiarowej. Praktyczną analizę wymiarową rozszerzono o parametry i kryteria mechaniki pęknięcia. Dalsza część poświęcona została syntetycznej charakterystyce głównych zasad mechaniki pęknięcia, stosownych parametrów i wynikających z tego kryteriów.

Słowa kluczowe: zasady wymiarowania, mechanika pęknięcia, parametry i kryteria

1. WSTĘP

Jedynym przeznaczeniem przestrzeni wymiarowej jest opis rzeczywistości materialnej. Jawne wysunięcie idei o wymiarze fizycznym jest zasługą Jean Bapriste Fouriera. W zakresie nauk technicznych - budowy i eksploatacji maszyn, cechą wspólną klasycznych metod wymiarowania jest oparcie się na hipotezach wytrzymałościowych i założenie, że materiał, z którego została wykonana konstrukcja jest idealnym ośrodkiem ciągłym (continuum materialne), zaś odpowiedni warunek wytrzymałościowy wynika z liniowej teorii sprężystości. Najpierw wyznacza się stan naprężenia i odkształcenia, a następnie obszary, gdzie osiągają one wartości ekstremalne. Może to spowodować powstanie w takich obszarach odkształcenia trwałego o wielkości uznanej za niebezpieczną lub nawet pęknięcia. W powyższym kontekście mówimy o miejscu największego wyężenia materiału, mając na myśli funkcję, której wartość liczbowa jest miarą zbyt wielkich odkształceń trwałych lub pęknięcia. Należy jednakże podkreślić, iż klasyczne hipotezy wyężeniowe - np. Hubera - Misesa ($H - M$) - oraz ich modyfikacje uwzględniające, oprócz drugich niezmienników dewiatora naprężeń, pozostałe niezmienniki tensorowe naprężeń lub traktujące w inny sposób zjawisko pęknięcia (np. hipoteza Dawidenkowa - Fridmana lub Pełczyńskiego) pomijają szereg ważnych aspektów dotyczących rzeczywistych warunków wyężenia materiału, np.:

- nie uwzględnia się tzw. efektu skali, pomijając cechy geometryczne konstrukcji,
- pomija się stan struktury materiału, jego heterogeniczność, wewnętrzne nieciągłości oraz wady powstałe np. w procesie wytwarzania konstrukcji lub w czasie eksploatacji,

- nie rozpatruje się samego przebiegu procesu zniszczenia,
- operuje się pojęciami, które zostały zbudowane dla modelu continuum.

Ponadto należy stwierdzić, iż sam fakt obecności nieciągłości w materiale typu szczelina, zgodnie z hipotezą wyężeniową np. Hubera - Misesa, oznaczałby przekroczenie wartości wyężenia materiału. Wynika to z faktu, iż naprężenia w otoczeniu wierzchołków szczeliny w ramach liniowej teorii sprężystości na ogół wzrastają nieograniczenie, niezależnie od wartości przyłożonych sił zewnętrznych [7].

W związku z powyższym, koniecznością staje się przyjęcie bardziej złożonych modeli aniżeli klasyczny model „continuum materialnego” poprzez wprowadzenie dodatkowych postulatów znalezienia wartości obciążeń krytycznych, przekroczenie których powoduje rozprzestrzenianie się szczelin. Należy stwierdzić, iż problem ten w równym stopniu odnosi się do oceny wyężenia materiałów poddanych procesowi technologicznemu, związanemu np. z nadawaniem stosownych kształtów i wymiarów elementowi konstrukcyjnemu i gotowym wytworom. Dotyczy to zwłaszcza obróbki plastycznej lub spajania, podczas których materiał doznaje znacznego wyężenia. Ponadto zagadnienie to obejmuje złożoną problematykę inżynierii materiałowej, dotyczącą projektowania nowych materiałów konstrukcyjnych, struktury materiału i stosownej relacji struktura - własności mechaniczne. Pełniejsze rozpoznanie tych zagadnień sprzyja ustaleniu optymalnych cech struktury i własności mechanicznych, a także - przy poprawnym rozpoznaniu i opisie problemów fizycznych zachodzących w czasie realizacji procesów technologicznych - umożliwi wprowadzenie elementów optymalizacyjnych, pozwalających spełnić postulaty inżynierii jakości.

W związku z tym wydaje się, że istotnym elementem uzupełniającym klasyczne sposoby wymiarowania materiałów i konstrukcji może być mechanika pękania - poprzez wprowadzenie nowych parametrów i kryteriów oceny wyężenia materiału, z uwzględnieniem obecności wad np. mikro- lub makropęknięć oraz innych niespełnionych postulatów procesu poprawnego wymiarowania.

Wobec powyższego rozważmy w dalszej kolejności główne zasady wymiarowania i podobieństwa z formalnego punktu widzenia.

2. UWAGI O WYMIAROWANIU I PODOBIENSTWIE MODELU I UKŁADU RZECZYWISTEGO

Proces konstruowania jakiegokolwiek wytworu możemy uznać za wykreowanie pewnej modelowej struktury, która w dalszej kolejności przybierze kształt realnej konstrukcji - układu rzeczywistego. W związku z powyższym przyjęcie i ustalenie właściwych relacji pomiędzy wymiarami stosowanymi przy budowie modelu a rzeczywistą konstrukcją należy uznać za pierwszy element poprawności procesu wymiarowania i stworzenia właściwej przestrzeni wymiarowej. Przestrzeń wymiarowa jest odzwierciedleniem matematycznego opisu modelu, wyróżniającym jego fizyczną strukturę i najbardziej istotne cechy. Według Polańskiego [8], model matematyczny obiektu badań materiałów (konstrukcji) oznacza odzwierciedlenie związków między czynnikami mającymi wpływ na budowę strukturalną i funkcjonowanie obiektu badań, wyrażone w kategoriach matematycznych.

Poprawny proces modelowania wymaga użycia właściwych, w sensie podobieństwa, modeli i warunków. Warunkiem koniecznym i dostatecznym występowania podo-

bieństwa między modelem rzeczywistym a obiektem jest opisanie zachodzących w nich procesów za pomocą:

- identycznych równań różniczkowych,
- zgodności kryteriów podobieństwa.

Mierzalnym wielkością fizycznym przypisuje się wymiary fizyczne. Skalarne wielkości fizyczne są elementami przestrzeni skalarów wymiarowych D . Przyjmuje się zwykle reguły mnożenia i podnoszenia do potęgi rzeczywistej. W D można wskazać szczególny podzbiór elementów zwanych wzorcami W . Skończony zespół wzorców W_1, \dots, W_n stanowi układ jednostek w D , jeżeli dowolny element A z D daje się jednoznacznie przedstawić w formie [10, 11]:

$$A = a W_1^{a^1} \dots W_n^{a^n} \quad (1)$$

gdzie:

(a, a^1, \dots, a^n) - układ liczb rzeczywistych.

Każdy podzbiór $\Omega \subset D$ składający się ze wszystkich A o ustalonych wykładnikach (a^1, \dots, a^n) nazywa się wymiarem. Wymiar Ω składa się z podzbioru Ω_+ określonego przez warunek $a > 0$, podzbioru Ω_- , dla którego $a < 0$ i swego zera wymiarowego. Podobieństwo τ względem układu jednostek W_1, \dots, W_n jest jednoznacznie określone przez zespół współczynników podobieństwa (τ_1, \dots, τ_n) .

Na przykład grupa podobieństw przestrzeni D mechaniki klasycznej działa w przestrzeni tensorów naprężeń zgodnie z regułą [11]:

$$\sigma \rightarrow \tau \sigma = (\tau_M \cdot \tau_L^{-1} \tau_T^{-2}) \sigma \quad (2)$$

gdzie:

- M - masa, g;
- L - wymiar geometryczny, cm;
- T - czas, s.

Kryteria i niezmienniki podobieństwa są liczbami bezwymiarowymi i otrzymujemy je w wyniku przekształcenia metodą podobieństwa modelu matematycznego procesu lub zjawiska fizycznego. Jeżeli i -tą zmienną w układzie rzeczywistym oznaczymy przez x_i , a w układzie modelowym symbolem \bar{x}_i , to dla obu układów zachodzą związki [3]:

$$\frac{x_i}{\bar{x}_i} = c_1, \dots, \frac{x_i}{\bar{x}_i} = c_i, \dots, \frac{x_n}{\bar{x}_n} = c_n \quad (3)$$

gdzie:

c_i - skala modelowania.

Skala modelowania, będąca w swojej istocie czynnikiem transformującym jest dla każdej zmiennej stała, lecz dla różnych zmiennych może posiadać różną wartość. Jeżeli do ogólnej formy równania zjawiska fizycznego $D(x_1, \dots, x_n)$ wprowadzimy wielkości \bar{x}_i , to zachodzi relacja:

$$D(x_1, x_2, \dots, x_n) = D(c_1 \bar{x}_1, c_2 \bar{x}_2, \dots, c_n \bar{x}_n) \quad (4)$$

Dla zjawisk fizycznych podobnych zachodzi związek:

$$D(x_1, x_2, \dots, x_n) = D(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \quad (5)$$

Zależność (5) jest spełniona, jeżeli czynniki transformacyjne spełniają warunek:

$$\psi(c_1, c_2, \dots, c_n) = 1$$

gdzie:

$$\psi(c_1, c_2, \dots, c_n) = \frac{D(c_1 \bar{x}_1, c_2 \bar{x}_2, \dots, c_n \bar{x}_n)}{D(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)} \quad (6)$$

Dla ciał geometrycznie podobnych, np. model - konstrukcja, oznacza to możliwość przekształcenia jednego w drugie za pomocą jedynokładności:

$$\frac{x_1}{\bar{x}_1} = \frac{x_2}{\bar{x}_2} = \frac{x_3}{\bar{x}_3} = c \quad (7)$$

gdzie:

x_1, x_2, x_3 i $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$ - są odpowiednio wymiarami obiektu rzeczywistego - konstrukcji i modelu przy zachowaniu podobieństwa zjawisk, które obejmuje również warunki brzegowe.

Wobec tego podstawowe prawo podobieństwa oznacza jednakowy stopień odkształcenia modelu i obiektu rzeczywistego:

$$\frac{\varepsilon}{\bar{\varepsilon}} = \frac{\Delta x}{x} \cdot \frac{\bar{x}}{\Delta \bar{x}} = c \cdot \frac{1}{c} = 1 \quad (8)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon \quad (9)$$

Podobieństwo zjawisk w procesie odkształcania obejmuje również:

- jednakowe własności materiału modelu i obiektu rzeczywistego przed odkształcaniem i w jego trakcie,
- jednakowy czas trwania odkształcenia modelu i obiektu rzeczywistego, ponieważ $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$, więc stopień odkształcenia powinien być również jednakowy,
- jednakową temperaturę modelu i obiektu rzeczywistego podczas odkształcenia i warunek ten jest zachowany w procesie izotermicznym i adiabatycznym, a dla innych procesów zależy od warunków odprowadzania ciepła.

Spełnienie wyżej wymienionych warunków, a zwłaszcza pierwszego i ostatniego, następuje praktycznie duże trudności.

Teoria podobieństwa jest w rzeczywistości w swojej strukturze matematycznej teorią symetrii (niezmienności). Każde przeskalowanie w układzie model - obiekt rzeczywisty (konstrukcja), realizowane przez podobieństwo mechaniczne, będzie prowadzić do poprawnej nowej sytuacji i jest ono główną treścią pracy wielu ośrodków naukowych, dążących do uproszczenia i obniżenia kosztów badań laboratoryjnych wielkogabarytowych konstrukcji.

Jest więc rzeczą oczywistą, iż przyjęcie modelu „continuum materialnego” jako podstawy do oceny wyężenia rzeczywistej konstrukcji, w której w formie jawnej występują nieciągłości o wymiarach mikro- lub makroskopowych, musi prowadzić do zawężenia przestrzeni wymiarowej, niezbędnej do poprawnego opisu zjawisk z fizycznego punktu widzenia.

Istotnym uzupełnieniem wymiarów stosowanych w mechanice kontinuum, takich jak energia = $L^2 MT^{-2}$, gęstość = $L^{-3} M$, naprężenie = $FL^{-2} = LMT^{-2}$, prędkość LT^{-1} , przyspieszenie LT^{-2} , siła $F = LMT^{-2}$, długość = L są nowe wymiary, wynikające z mechaniki pękania. Do najważniejszych i najczęściej używanych należą: współczynnik intensywności naprężenia $K_{n=I,II,III} = FL^{-3/2} = MT^{-2} L^{-1/2}$, rozwarcie wierzchołkowe pęknięcia δ - CTOD = L , współczynnik uwalniania energii (strain energy release rate) lub siła wydłużająca pęknięcie (crack extension force) $G = FL^{-1} = MT^{-2}$, całka Rice’a - Čerepanova $J = FL^{-1} = MT^{-2}$.

3. SYNTETYCZNA CHARAKTERYSTYKA PARAMETRÓW I KRYTERIÓW MECHANIKI PĘKANIA

W niniejszym opracowaniu ograniczymy się do charakterystyki parametrów i kryteriów mechaniki pękania, uzupełniających przestrzeń wymiarową opartą na liniowej teorii sprężystości. U podstaw mechaniki pękania leży koncepcja i model Griffitha, który wprowadził do modelu kontinuum nieciągłość o charakterze szczeliny o długości $2a$. Model ten został on w latach 50-tych zmodyfikowany przez Irwina, któremu zawdzięczamy wprowadzenie do analizy wymiarowej procesu wyężenia materiału takich parametrów jak współczynnik intensywności naprężenia K_n , współczynnik uwalniania energii G oraz współautorstwo wraz z Wellsem parametru δ_c , określającego rozwarcie wierzchołkowe szczeliny. Zgodnie z ich interpretacją fizyczną, charakteryzują one stopień wyężenia materiału w obszarze przywierzchołkowym szczeliny, decydującym o rozwoju i propagacji szczeliny (pęknięcia). Nie są to jednak jeszcze kryteria inicjacji rozwoju szczeliny. Bardzo użytecznym narzędziem w mechanice pękania jest również całka niezmiennicza od drogi całkowania wokół wierzchołka szczeliny J , wprowadzona przez Rice’a i Čerepanova.

Współczynnik intensywności naprężenia K_n

Współczynnik intensywności naprężenia K_n jest parametrem, który określa poziom naprężeń lub odkształceń w sąsiedztwie wierzchołka pęknięcia. Wynika to z faktu, iż stan naprężenia $\sigma_{ij}(r, \theta)$ i przemieszczenie $u_i(r, \theta)$ są w bezpośredniej relacji z K_n , co w sposób syntetyczny charakteryzuje następujące zależności [2]:

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[K_I f_I^I(\theta) + K_{II} f_I^{II}(\theta) + K_{III} f_I^{III}(\theta) \right] \quad (10)$$

$$u_i(r, \theta) = \frac{1}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[K_I g_i^I(\theta) + K_{II} g_i^{II}(\theta) + K_{III} g_i^{III}(\theta) \right] \quad (11)$$

gdzie:

- r - odległość od wierzchołka szczeliny,
- θ - kąt, druga współrzędna biegunowa,
- $f_i^n(\theta)$ i $g_i^n(\theta)$ - bezwymiarowe funkcje kąta θ ,
- $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ - moduł ścinania,
- K_n - współczynnik intensywności naprężenia ($n = I$ - rozrywanie, $n = II$ - ścinanie wzdłużne, $n = III$ - ścinanie poprzeczne),
- i, j - odpowiadają współrzędnym kartezjańskim lub współrzędnym cylindrycznym r, θ, z .

Z uwagi na to, iż zależności określające stan naprężenia w sąsiedztwie wierzchołka szczeliny zostały określone przy założeniu idealnie sprężystego modelu ciała, gdy $r \rightarrow 0$, to $\sigma_{ij} \rightarrow \infty$. Wobec tego, pole naprężeń ma osobliwość w punkcie $r = 0$. W rzeczywistości już przy niewielkim obciążeniu zewnętrznym w sąsiedztwie wierzchołka pęknięcia pojawia się obszar odkształcony plastycznie. Irwin, zakładając słuszność rozkładu naprężeń, wprowadził korektę długości szczeliny, powiększając jej długość o wymiar strefy odkształceń plastycznych r_p , - rysunek 1. Wielkość strefy odkształceń plastycznych jest uzależniona od relacji $(K_I/K_e)^2$ i wynosi:

- płaski stan odkształcenia:

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2 \quad (12a)$$

- płaski stan naprężenia:

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2 \quad (12b)$$

Praktycznie dla $r_p < 0,01a$ można stosować rozwiązania liniowej mechaniki pęknięcia. Współczynnik intensywności naprężenia K_n jest funkcją obciążenia ciała (elementu, konstrukcji), wymiarów pęknięcia a , geometrii ciała i pęknięcia, co najogólniej możemy scharakteryzować jako:

$$K_n = K_n(\sigma_{obc}, a, \text{geometria ciała i pęknięcia}) \quad (13)$$

Bazując na ocenie stanu naprężenia w sąsiedztwie wierzchołka szczeliny, zgodnie z rozwiązaniem Irwina [1], współczynnik intensywności naprężenia ocenimy jako:

$$K_I = \lim_{x \rightarrow a} \sqrt{2\pi(x-a)} \sigma_{yy}(x, 0, 0) = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(x, 0, 0) \quad (14a)$$

$$K_{II} = \lim_{x \rightarrow a} \sqrt{2\pi(x-a)} \sigma_{xy}(x, 0, 0) = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{xy}(x, 0, 0) \quad (14b)$$

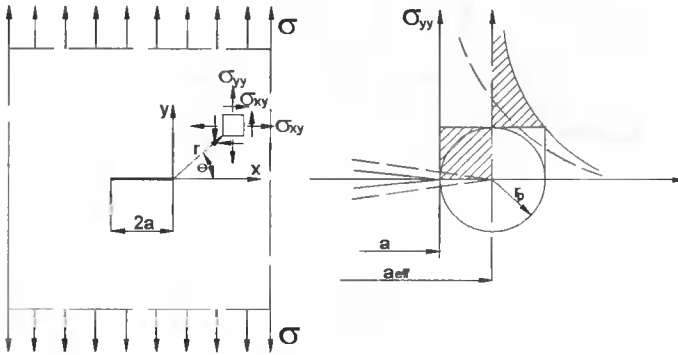
$$K_{III} = \lim_{x \rightarrow a} \sqrt{2\pi(x-a)} \sigma_{yz}(x, 0, 0) = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yz}(x, 0, 0) \quad (14c)$$

W przypadku innych elementów niż model płyty o nieskończonych wymiarach i jednostkowej grubości, współczynnik intensywności naprężenia określa się rozwiązując dane zagadnienie brzegowe. Na przykład dla płaskiej płyty o skończonych wymiarach $2H \times W$ i grubości B z centralnie umiejscowioną szczeliną $2a$, poddanej działaniu równomiernego naprężenia σ , zależność określająca K_I wynosi [6]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F_1(\alpha, B) \quad (15)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{2a}{W}; \quad B = \frac{2H}{W}$$



Rys. 1. Model płyty z pęknięciem o długości $2a$ oraz stan naprężeń:

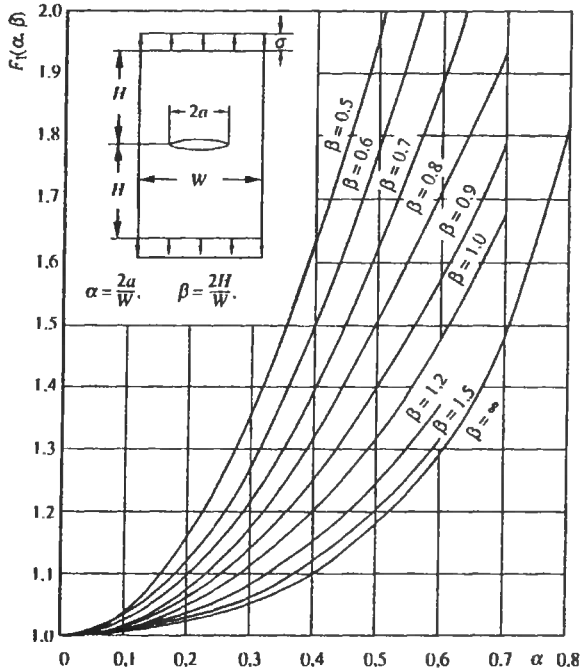
- a. w ośrodku sprężystym, b. z uwzględnieniem strefy odkształceń plastycznych o wymiarze r_p wg Irwina ($a_{\text{eff}} = a + r_p$)

Wykres funkcji $F_1(\alpha, B)$ przedstawiono na rysunku 2.

W praktyce inżynierskiej K_n może być istotnym elementem w analizie wymiarowej konstrukcji.

Dla konstruktora może stanowić wielkość o podwójnym znaczeniu:

- przy określonej wielkości obciążeń można ustalić największy dopuszczalny wymiar wad materiałowych (np. w połączeniach spawanych wady typu wtrącenia, zażużlenia, pęknięcia) oraz w sposób racjonalny klasę spoin,
- przy stwierdzeniu obecności wad o określonych wymiarach w konstrukcji można określić dopuszczalną i bezpieczną wielkość oraz rodzaj obciążenia danego elementu lub konstrukcji.

Rys. 2. Wykres funkcji $F_1(\alpha, B)$ [6]

Wobec powyższego, zgodnie z zależnością (15) możemy określić:
 - wymiar dopuszczalny wady:

$$a \leq \frac{K_I^2}{\pi[\sigma \cdot F_1(\alpha, B)]^2} \quad [\text{m}] \quad (16)$$

- wartość naprężeń dopuszczalnych:

$$\sigma \leq \frac{K_I}{\sqrt{\pi a} F_1(\alpha, B)} \quad [\text{MPa}] \quad (17)$$

Należy podkreślić, iż powyższe zależności zostały określone dla pęknięcia (szczeliny), dla którego promień krzywizny wierzchołka $\rho_e \rightarrow 0$. Jeżeli $\rho_e \neq 0$, to K_I jest proporcjonalne do pierwiastka kwadratowego krzywizny ρ_e wierzchołka obciążonego hipotetycznego pęknięcia w zakresie liniowej sprężystości i odpowiednio wynosi [2]:

- płaski stan odkształcenia w sąsiedztwie wierzchołka szczeliny:

$$K_I = \sqrt{2\pi}(1-\nu)\mu\sqrt{\rho_e} \quad (18a)$$

- płaski stan naprężenia:

$$K_I = \sqrt{4\pi}\mu\sqrt{\rho_e} \quad (18b)$$

gdzie:

- ν - współczynnik Poissona,
- μ - moduł ścinania.

Współczynnik uwalniania energii G

Idea zmodyfikowanej teorii Griffitha polega na powiązaniu energii niezbędnej do jednostkowego wydłużenia pęknięcia z ilością energii sprężystej, która ubyła z otoczenia pęknięcia. Przyrost różnicy pomiędzy zgromadzoną energią sprężystą W_e i pracą obciążenia zewnętrznego U przez jednostkowy przyrost powierzchni A hipotetycznego pęknięcia w zakresie liniowej sprężystości wynosi [2]:

$$G = \Delta(W_e - U) / \Delta A \quad [\text{Nm}^{-1}] \quad \text{lub} \quad [\text{Jm}^{-2}] \quad (19)$$

Autorem powyższej koncepcji jest Irwin. Zgromadzona energia sprężysta W_e obejmuje całkowitą pracę deformacji sprężystych ciała. Jeżeli występują plastyczne deformacje, W_e jest tylko sprężystą częścią gęstości energii odkształcenia. W zakresie sprężystości, gdy działa tylko obciążenie, energia sprężysta jest równa pracy wykonanej przez to obciążenie. Należy również stwierdzić, że istnieje ścisła relacja pomiędzy G_n i K_n ($n = \text{I, II, III}$). Pozwala to określić G_n w następujący sposób:

- płaski stan naprężenia:

$$G_{\text{I}} = \frac{K_{\text{I}}^2}{E} \quad (20a)$$

$$G_{\text{II}} = \frac{K_{\text{II}}^2}{E} \quad (20b)$$

$$G_{\text{III}} = (1 + \nu) \frac{K_{\text{III}}^2}{E} = \frac{K_{\text{III}}^2}{2\mu} \quad (20c)$$

- płaski stan odkształcenia:

$$G_{\text{I}} = (1 - \nu^2) \frac{K_{\text{I}}^2}{E} \quad (21a)$$

$$G_{\text{II}} = (1 - \nu^2) \frac{K_{\text{II}}^2}{E} \quad (21b)$$

$$G_{\text{III}} = (1 + \nu) \frac{K_{\text{III}}^2}{E} = \frac{K_{\text{III}}^2}{2\mu} \quad (21c)$$

Przy złożonym stanie obciążenia ($n = \text{I, II, III}$) całkowita wartość G wynosi:

$$G = G_{\text{I}} + G_{\text{II}} + G_{\text{III}} \quad (22)$$

Po uwzględnieniu zależności (20 a, b, c) i (21 a, b, c) równanie (22) przyjmuje postać:

- płaski stan naprężenia:

$$G = \frac{(K_I^2 + K_{II}^2)}{E} + \frac{K_{III}^2}{2\mu} \quad (23)$$

- płaski stan odkształcenia:

$$G = \frac{(K_I^2 + K_{II}^2)(1 - \nu^2)}{E} + \frac{K_{III}^2}{2\mu} \quad (24)$$

W czasie przyrostu pęknięcia zmienia się również podatność C elementu z pęknięciem, co ostatecznie pozwala nam określić G jako:

$$G = \frac{1}{2} F^2 \frac{\partial C}{\partial A} \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (25)$$

gdzie:

$$C - \text{podatność } (u = CF \rightarrow C = uF^{-1}), \quad N^{-1}m.$$

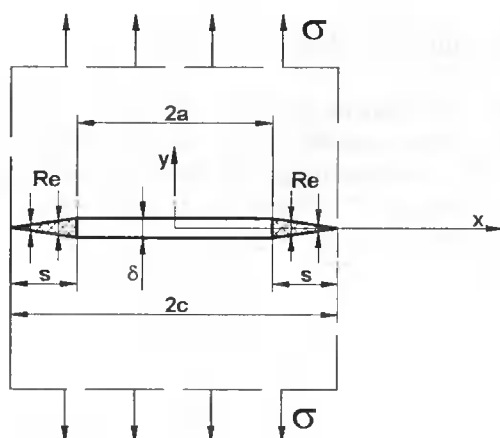
Rozwarcie wierzchołka szczeliny (CTOD)

Obecność strefy odkształcenia plastycznego w sąsiedztwie wierzchołka pęknięcia stwarza ograniczenia w zakresie praktycznego stosowania liniowej mechaniki pęknięcia do oceny metali i ich stopów. Istotną więc rzeczą jest wypełnienie luki i wprowadzenie odpowiedniego kryterium, kiedy tracą swą moc zależności określone przy pomocy liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia. Jest to również ważny przypadek, gdyż różnorodne wady zdolne są spowodować szybkie i nagłe zniszczenie przy naprężeniu niższym od granicy plastyczności.

Zjawisko to jest podobne do kruchego zniszczenia, z tą różnicą, że znaczna miejscowa plastyczna deformacja powoduje zanik ważności zależności matematycznych liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia. Współczesny poziom wiedzy niestety nie pozwala nam określić wystarczająco dokładnie wartości naprężeń w zakresie odkształceń sprężysto-plastycznych. Powyższą trudność pokazano zakładając, iż konstrukcja ulegnie zniszczeniu, gdy odkształcenie przy krawędzi pęknięcia lub wady osiągnie określoną wielkość. Ponieważ rozważania dotyczą małych i nieokreślonych odległości, warunki zniszczenia wygodniej jest wyrazić poprzez przemieszczenie, a nie przez wielkość obszaru odkształconego. Autorem powyższej koncepcji jest Wells, chociaż wynika ona również z analizy Irwina.

Do rozważań przyjęto model pęknięcia według Dugdale'a - rysunek 3.

W tym modelu przyjęto istnienie wąskiej strefy plastyczności o kształcie klinowym, przylegającej bezpośrednio do wierzchołka pęknięcia. Pod działaniem naprężenia σ długość pęknięcia $2a$ wraz ze strefą odkształcenia plastycznego wzrasta do długości $2c$. Rozwój pęknięcia i jego rozwarcie częściowo wstrzymywane jest równomiernie rozłożonym wewnętrznym naprężeniem działającym na powierzchni od $x = \pm a$ do $x = \pm c$, równemu $\sigma_0 = R_e$.



Rys. 3. Model pęknięcia według Dugdale'a

Wielkość rozwarcia pęknięcia, zgodnie z opracowaniem [4, 6] określa zależność:

$$\delta = \frac{8\sigma_0 a}{\pi E} \ln \left(\sec \frac{\pi \sigma}{2\sigma_0} \right) \quad (26)$$

gdzie:

σ_0 - naprężenie odpowiadające granicy plastyczności.

Rozwijając powyższy wzór w szeregu Maclaurina otrzymamy:

$$\delta = \frac{8\sigma_0 a}{\pi E} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\pi \sigma}{2\sigma_0} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{\pi \sigma}{2\sigma_0} \right)^4 + \frac{1}{45} \left(\frac{\pi \sigma}{2\sigma_0} \right)^6 + \dots \right] \quad (27)$$

Pozostawiamy do dalszych rozważań tylko pierwszy człon szeregu, wartość rozwarcia pęknięcia δ wynosi:

$$\delta = \frac{\pi \sigma^2 a}{E \sigma_0} = \frac{K_I^2}{E \sigma_0} \quad (28)$$

Dzieląc równanie (18a), określające G_I , przez σ_0 i porównując otrzymane wyrażenie ze wzorem (26) otrzymamy bezpośredni związek pomiędzy G i δ :

$$G_I = \sigma_0 \delta \quad (29)$$

Eksperymentalne wyniki badań wskazują na słuszność powyższej zależności do $\sigma \leq R_e$.

Analiza przeprowadzona dodatkowo przy pomocy metody elementów skończonych wykazała słuszność powyższych rozważań, aż do momentu osiągnięcia R_e w całym przekroju.

Całka niezmiennicza J Rice'a - Čerepanova

Określenie całki J opiera się na analizie energetycznej procesu pęknięcia i polegającej na określeniu zmiany energii potencjalnej P ciała nieliniowo - sprężystego ze wzrostem szczeliny „a” o wartość nieskończenie małą da. Przyrost różnicy pomiędzy W_e i U przez jednostkowy przyrost powierzchni hipotetycznego pęknięcia A w nieliniowej sprężystości pozwala określić J jako [2,6]:

$$J = - \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (30a)$$

lub

$$J = - \frac{\partial P}{\partial a} \quad (30b)$$

W zakresie sprężystym zależność (30) jest równa całce Rice'a - Čerepanova:

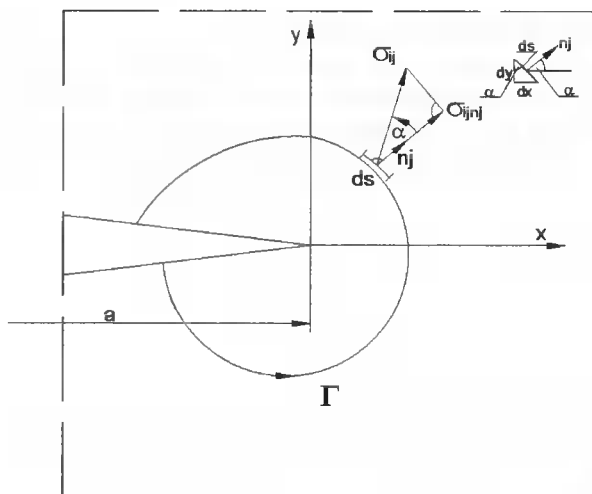
$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - \sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (31)$$

gdzie:

- W - gęstość energii odkształcenia $\left(\int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \right)$,
- Γ - droga całkowania wzdłuż zamkniętego konturu, otaczającego wierzchołek pęknięcia w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara począwszy od dolnej powierzchni pęknięcia - rysunek 4,
- ds - element konturu Γ ,
- u_i - wektor przemieszczenia ds,
- $\sigma_{ij} n_j$ - składowa wektora naprężeń normalna do konturu Γ przy ds,
- x, y - współrzędne prostokątne usytuowane we wierzchołku pęknięcia,
- $\sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x} ds$ - jednostkowa gęstość energii uwalnianej z pola naprężeń ograniczonego konturem Γ ,
- n - jednostkowy wektor normalny do konturu Γ .

W zakresie liniowej sprężystości $J = G$.

Całka charakteryzuje osobliwość pola naprężeń, odkształceń i gęstości energii odkształcenia w nieliniowej sprężystości i plastyczności. W zakresie odkształceniowej teorii plastyczności można wykazać, że J kontroluje naprężenia i odkształcenia blisko pola wierzchołkowego, podobnie jak K w liniowej sprężystości, co zostało określone przez Hutchinsona, Rice i Rosengreena [5].

Rys. 4. Dwuwymiarowy schemat ciała z pęknięciem a i konturem całkowania Γ

Rozkład naprężeń i odkształceń w bezpośrednim otoczeniu wierzchołka pęknięcia jest oznaczony jako pola HRR. Jeżeli umieścimy biegunowy układ współrzędnych we wierzchołku pęknięcia, to dla $r \rightarrow 0$ naprężenia i odkształcenia określimy jako funkcję J :

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \left[\frac{J}{I_n \sigma_0 \varepsilon_0 A r} \right]^{\frac{1}{n+1}} \cdot \tilde{\sigma}_{ij}(\varphi, n) \quad (32)$$

$$\varepsilon_{ij} = A \varepsilon_0 \left[\frac{J}{I_n \sigma_0 \varepsilon_0 A r} \right]^{\frac{n}{n+1}} \cdot \tilde{\varepsilon}_{ij}(\varphi, n) \quad (33)$$

gdzie:

$A, n, \varepsilon_0, \sigma_0$ - stałe materiałowe, określone zgodnie z równaniem Ramberga - Osgooda,

I_n - współczynnik zależny umocnienia materiału n ,

$\tilde{\sigma}_{ij}(\varphi, n)$

$\tilde{\varepsilon}_{ij}(\varphi, n)$ - bezwymiarowe funkcje określone w opracowaniu [4 i 12].

W pobliżu wierzchołka pęknięcia gęstość energii odkształcenia, która zmienia się jak r^{-1} jest proporcjonalna do J . Zakres stosowania zależności (30), (31) zależy od stanu naprężenia, współczynnika umocnienia oraz geometrii elementu [4].

Kryteria inicjacji rozwoju pęknięcia

Przedstawiona powyżej krótka ocena sytuacji wokół wierzchołka szczeliny stacjonarnej wskazuje na podobieństwo struktury pola naprężeń i charakteryzuje się tym, iż jest to pole

osobliwe, co automatycznie wyklucza użycie klasycznych hipotez wyężeniowych i analiz wytrzymałościowych. W związku z tym praktycznie wykorzystuje się amplitudę pola osobliwego, tzn. K , J lub energię odkształcenia w obszarze przywierzchołkowym, posiadającą wartość skończoną przy $r \rightarrow 0$. Wobec powyższego, lokalne kryteria inicjacji wzrostu szczeliny stacjonarnej bazują głównie na następujących kryteriach:

$$K_n = K_{nc} \quad (34a)$$

$$G_n = G_{nc} \quad (34b)$$

$$J_n = J_{nc} \quad (34c)$$

$$\delta_T = \delta_{Tc} \quad (34d)$$

W zakresie przywierzchołkowego uplastycznienia małego zasięgu wyżej wymienione kryteria są ze sobą powiązane. Lewe strony zostały scharakteryzowane uprzednio, natomiast parametry K_{nc} , G_{nc} , J_{nc} , δ_{Tc} są stałymi materiałowymi - odpornością na pękanie - wyznaczanymi eksperymentalnie w warunkach laboratoryjnych i są znormalizowane [9]. W kraju zostały znormalizowane metody badań odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia (PN-87/H-04335) i metoda badania odporności na pękanie przez wyznaczanie krytycznej wartości J , J_{IC} (PN-88/H-04336).

4. WNIOSKI

Wprowadzenie nowych parametrów i kryteriów mechaniki pękania pozwala znacząco rozszerzyć analizę wymiarowania materiałów i konstrukcji z uwzględnieniem nieciągłości strukturalnych i zwykłych wad materiałowych. Jest również zgodne z regułami poprawnego modelowania procesu wyężenia materiału. Związane jest to bezpośrednio z możliwością optymalizowania procesu konstruowania. Należy podkreślić, że parametry i kryteria mechaniki pękania znalazły również zastosowanie w analizie wymiarowej procesów technologicznych, związanych ze znacznym wyężeniem materiału w procesie wytwórczym, np. w czasie obróbki plastycznej, procesie spajania metali itp.

LITERATURA

- [1] Erdogan F., 1983. Stress Intensity Factors. Journal of Applied Mechanics, 992-1002.
- [2] François D., 1996. Guidelines for terminology and nomenclature in the field of structural integrity. Fatigue Fract. Enging. Mater. Struct., 1-18.
- [3] Gabryszewski Z., Gronostajski J., 1991. Mechanika procesów obróbki plastycznej. PWN Warszawa.
- [4] Gołaski L., 1992. Elementy doświadczalnej mechaniki pękania. Politechnika Świętokrzyska, Kielce.

- [5] Kienzler R., 1997. Elastic - plastic fracture mechanics. In: Failure in Structures, Kielce-Amelówka, 131-165.
- [6] Neimitz A., 1998. Mechanika pęknięcia. PWN Warszawa.
- [7] Olesiak Z., 1988. Koncentracja naprężeń, naprężenia kontaktowe. Mechanika Techniczna. Wytrzymałość elementów konstrukcyjnych. Red. M. Życzkowski, PWN Warszawa.
- [8] Polański Z., 1977. Metody optymalizacji w technologii maszyn. PWN Warszawa.
- [9] Ranatowski E., 1999. Fracture of mismatched weld joints. Zesz. Nauk. Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika 68, 149-158.
- [10] Rychlewski J., 1991. Wymiary i podobieństwo. PWN Warszawa.
- [11] Rychlewski J., 1991. Symetria przyczyn i skutków. PWN Warszawa.
- [12] Shih C.F., 1974. Small - scale yielding analysis of mixed mode plane - strain crack problems. In: Fracture Analysis, ASTM STP 560, 187-210.

THEORETICAL FUNDAMENTAL RULES OF MATERIALS AND CONSTRUCTIONS DIMENSIONING WITH FRACTURE MECHANICS

Summary

The article presents general materials and constructions dimensioning and mechanical similarity rules drawing on the similarities of the model and the real systems in the physical dimensioning space. The practical dimensioning analysis has been extended by fracture parameters and criterions. Further on in the paper one is offered a brief characteristics of the basic fracture mechanics parameters and criterions.

Keywords: dimensioning rules, fracture mechanics, parameters and criterions

PRAKTYCZNE ASPEKTY WYMIAROWANIA MATERIAŁÓW I KONSTRUKCJI Z WYKORZYSTANIEM MECHANIKI PĘKANIA

Eugeniusz Ranatowski

Katedra Materiałoznawstwa i Technologii Metali
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pracy przedstawiono praktyczne aspekty wykorzystania zasad wymiarowania i podobieństwa oraz mechaniki pęknięcia do wymiarowania materiałów i konstrukcji (wraz z przykładami obliczeniowymi). Wykonano modyfikację klasycznego modelu E-T-M opartego o normalizowaną wartość $\delta_R = \delta_W / \delta_B$, a także normalizowaną wartość $K_{IR} = K_{Ith} / K_{IC}$.

Słowa kluczowe: kryteria mechaniki pęknięcia, niejednorodność strukturalna, pęknięcie wodorowe

1. WSTĘP

Zgodnie z rozwiązaniami klasycznej mechaniki pęknięcia, podstawą do analizy jest model continuum materialnego, w którym usytuowana jest szczelina. Wprowadzenie nowej zmiennej, którą jest wzrastająca długość szczeliny, pod wpływem pola siłowego, prowadzi do oceny parametrów mechaniki pęknięcia K_n , G_n , J_n , δ_T . Wiążąc powyższe parametry odpowiednio z odpornością na pęknięcie K_{nc} , G_{nc} , J_{nc} , δ_{Tc} , tworzymy podstawowe kryteria mechaniki pęknięcia $K_n = K_{nc}$, $G_n = G_{nc}$, $J_n = J_{nc}$, $\delta_T = \delta_{Tc}$.

Kryteria te charakteryzują więc stopień wyężenia materiału w obszarze przywierzchołkowym szczeliny. W klasycznych rozwiązaniach liniowej i sprężysto-plastycznej mechaniki pęknięcia zakładamy, iż cechą analizowanego ośrodka materialnego jest izotropowość cech fizycznych (w tym mechanicznych), niezmiennych w czasie t. Odnosząc powyższe kryteria do oceny stopnia wyężenia złączy spawanych, możemy uznać lewe strony równań i parametry K_n , G_n , J_n , δ_T za wypadkowe czynniki konstrukcyjno-technologiczne uzależnione od:

- rodzaju i stanu obciążenia i naprężenia,
- konfiguracji i wymiarów szczeliny,
- cech geometrycznych konstrukcji lub elementu.

Prawe strony równań, określane eksperymentalnie w warunkach laboratoryjnych, z uwagi na bezpośrednie powiązanie ich z cechami fizycznymi materiału możemy uznać za wskaźnik uwrażliwienia materiału na proces spawania. Badając więc różne strefy złącza spawanego – spoiny lub strefy wpływu ciepła uzyskamy kompleksową ocenę odporności złącza na pęknięcie. Powyższa koncepcja w odniesieniu do połączeń spawa-

nych wymaga jednakże modyfikacji, między innymi z uwagi na znaczne odstępstwa od podstawowego modelu fizycznego, bazującego na izotropowości i niezmienności cech fizycznych materiału w czasie.

Proces spawania może wpływać na lokalne zmiany struktury o znacznym stopniu heterogeniczności, co zasadniczo prowadzi do:

- lokalnych zmian cech wytrzymałościowych,
- niestabilności cech mechanicznych i parametrów fizycznych, spowodowanych np. obecnością wodoru lub temperatury.

2. UWAGI O WYMIAROWANIU MATERIAŁÓW I KONSTRUKCJI PRZY WYKORZYSTANIU MECHANIKI PĘKANIA

Aktualne metody mechaniki pęknięcia są szeroko stosowane w ocenie odporności na pęknięcie i wymiarowaniu konstrukcji wykonanych głównie z materiałów o wysokiej wytrzymałości. Należą do nich wielkogabarytowe konstrukcje stalowe, urządzenia energetyczne, konstrukcje okrętowe itp. Mniejsze zastosowanie znalazły natomiast w obliczeniach i wymiarowaniu konstrukcji i maszyn wykonanych z materiałów o niskiej wytrzymałości. Chodzi tu głównie o niskowęglowe lub niskostopowe stale ferrytyczne.

Wymiarowanie konstrukcji, zgodnie z mechaniką pęknięcia, wykonuje się według jednego z dwóch warunków:

- krytycznego rozmiaru wady tolerowanej (pęknięcia) przy zadanym obciążeniu,
- krytycznego obciążenia przy znanych rozmiarach wady (pęknięcia).

W odniesieniu do podstawowego kryterium liniowej mechaniki pęknięcia $K_I \leq K_{IC}$, praktycznym sposobem realizacji wyżej wymienionych postulatów jest np. transformacja zależności [1]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F_I(\alpha, B) \quad (1)$$

w formę użyteczną do oceny:

- wymiaru dopuszczalnej wady:

$$a \leq \frac{K_I^2}{\pi [\sigma \cdot F_I(\alpha, B)]} \quad (2)$$

- wartości naprężeń dopuszczalnych:

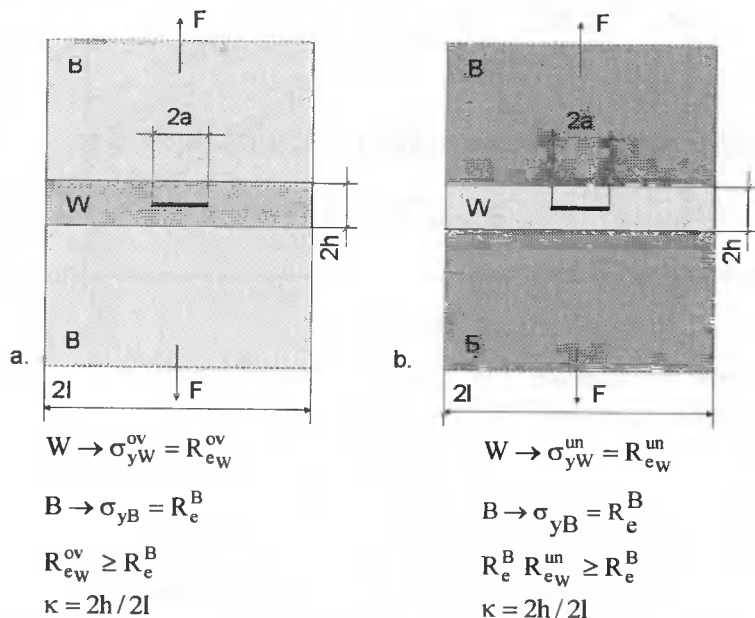
$$\sigma \leq \frac{K_I}{\sqrt{\pi a} F_I(\alpha, B)} \quad (3)$$

Zależność (1) opisuje wartość współczynnika intensywności naprężenia K_I dla płyty o skończonych wymiarach (W – szerokość, $2H$ – wysokość) ze szczeliną $2a$ usytuowaną w centralnej części płyty, rozciąganej naprężeniem σ normalnym do powierzchni szczeliny, gdzie:

$$\alpha = \frac{2a}{W} \quad ; \quad B = \frac{2H}{W}$$

$F_I(\alpha, B)$ - funkcja określona według [1].

Jest faktem, że istnieje asymetria w zakresie oceny lewej i prawej strony kryteriów mechaniki pękania. Istotnym odstępstwem od zasad modelowania i poprawnego wymiarowania jest przyjęcie jako stałych cech własności mechanicznych materiałów i jego izotropowości. Sytuacja taka może wystąpić np. w złączach spajanych w wyniku lokalnej heterogeniczności w skali mikro- i makroskopowej lub w obecności wodoru lokalnej pozostałości procesu spajania. W tym przypadku koniecznością staje się modyfikacja podstawowych rozwiązań mechaniki pękania i wprowadzenie zmodyfikowanego modelu ciała. W przypadku znaczącego zróżnicowania cech własności mechanicznych składników mikrostruktury, np. martenzytu i bainitu lub perlitu i ferrytu, poprawna ocena relacji struktura - własności mechaniczne takiego materiału wymaga uwzględnienia wpływu więzów mechanicznych (constraint effect). Taka sama sytuacja wystąpi w skali makroskopowej w przypadku występowania stref o zróżnicowanych własnościach mechanicznych, co ma miejsce w czasie obróbki plastycznej lub cieplnej, odlewach lub połączeniach spajanych. Jako przykład poprawnego przyjęcia stosownego modelu w skali makroskopowej przedstawiono sytuację na rysunku 1.



Rys. 1. Model niejednorodnego połączenia płyty spoiną o odmiennych własnościach chemicznych (R_e - granica plastyczności strefy B lub W)

Przy założeniu idealnych własności spężyto-plastycznych stref B i W zależności analityczne charakteryzujące normalizowaną wartość parametru $\delta_R = \delta_W / \delta_B$, zgodnie z opracowaniem [2], można scharakteryzować następująco:

- dla modelu przedstawionego na rysunku 1a - $K_s = R_e^B / R_e^{W(ov)} < 1$:

$$\sigma_1 < R_e^B < R_e^{W(ov)}$$

dolna wartość graniczna:

$$\delta_R = K_S \quad (4)$$

górna wartość graniczna:

$$\delta_R = \frac{K_S (2 + K_S^2)}{3} \quad (5)$$

$$R_e^{W(ov)} > \sigma_1 \geq R_e^B \quad \delta_R = \left(\frac{K_W^{ov}}{K_S} \right) \left(1 - \frac{1}{n_B} \right) \quad (6)$$

$$\sigma_1 \geq R_e^{W(ov)} \geq R_e^B \quad \delta_R = \left(\frac{K_W^{ov}}{K_S} \right) \left(\frac{1}{n_W} - \frac{1}{n_B} \right) \left(\frac{1}{K_S} \right) \left(1 - \frac{1}{n_W} \right) \quad (7)$$

- dla modelu przedstawionego na rysunku 1b - $K_S = R_e^B / R_e^{W(un)} > 1$:

$$\sigma_1 < R_e^{W(un)} < R_e^B$$

dolna wartość graniczna:

$$\delta_R = K_S \quad (8)$$

górna wartość graniczna:

$$\delta_R = \frac{3}{2} \frac{1}{\frac{1}{K_S} + \frac{1}{2K_S^3}} \quad (9)$$

$$R_e^B > \sigma_1 \geq R_e^{W(un)} \quad \delta_R = \left(\frac{K_W^{un}}{K_S} \right) \left(1 - \frac{1}{n_W} \right) \quad (10)$$

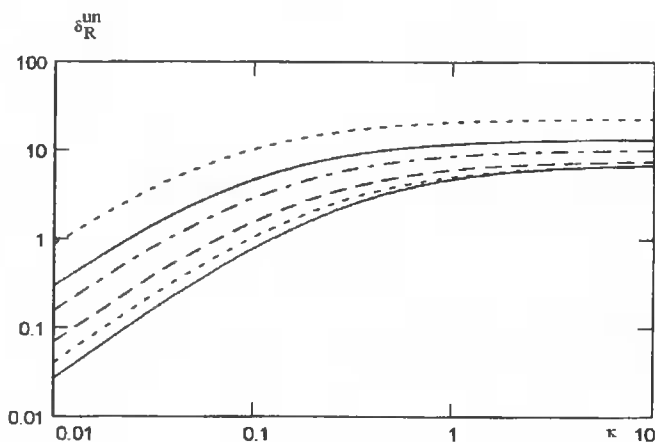
$$\sigma_1 \geq R_e^B \geq R_e^{W(un)} \quad \delta_R = \left(\frac{K_W^{un}}{K_S} \right) \left(\frac{1}{n_W} - \frac{1}{n_B} \right) \left(\frac{1}{K_S} \right) \left(1 - \frac{1}{n_W} \right) \quad (11)$$

gdzie:

K_W^{ov} - parametr uwzględniający wpływ oddziaływania więzów mechanicznych i zmiany stanu naprężenia w obszarze zróżnicowania struktury dla $K_S = R_e^B / R_e^{W(ov)} < 1$,

- K_W^{un} - parametr uwzględniający wpływ oddziaływania więzów mechanicznych i zmiany stanu naprężenia w obszarze zróżnicowania struktury dla $K_S = R_e^B / R_e^{W(un)} > 1$,
- n_W, n_B - współczynniki umocnienia materiału stref B i W.

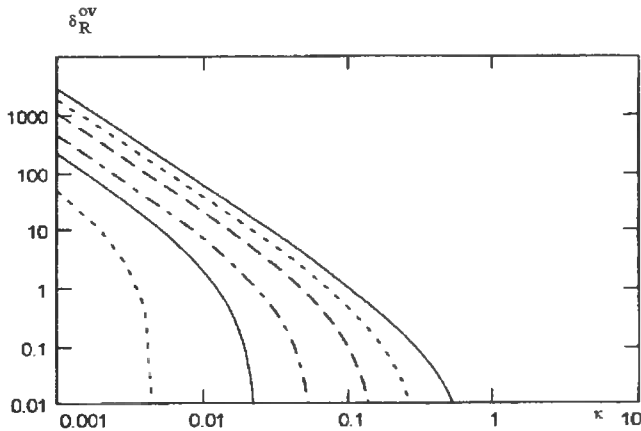
Dla powyższych modeli na rysunkach 2 i 3 przedstawiono zmianę wartości normalizowanego parametru $\delta_R = \delta_W / \delta_B$, charakteryzującego zmianę wartości δ_W rozwarcia wierzchołka pęknięcia 2a w spoinie (lub strefie wpływu ciepła) w stosunku do materiału rodzimego B - δ_B , zgodnie ze wzorami (7) i (11).



Rys. 2. Wykres δ_R^{un} jako funkcji $\kappa = 0,01 \div 10$ dla $q = 0, \div 0,9$ i $K_s = 1,39$ oraz wartościach $R_e^{W(un)} = 434 \text{ MPa}$, $R_e^B = 605 \text{ MPa}$, $n_W^{un} = 0,20$, $n_B = 0,15$

Istotnym czynnikiem zmiany własności mechanicznych ośrodków materialnych jest również obecność gazów w strukturze metali, a zwłaszcza wodoru. Zmieniona sytuacja wymaga wprowadzenia zamiast K_{IC} , progowej jego wartości K_{Ith} .

Bardzo często spotykanym parametrem bezwymiarowym jest $K_{IR} = K_{Ith} / K_{IC}$; wskazuje on bezpośrednio na zmianę odporności materiału na pęknięcie w stosunku do sytuacji, gdy wodór nie występuje w zwiększonej ilości, a stosownym parametrem jest K_{IC} .



Rys. 3. Wykres δ_R^{ov} jako funkcji $\kappa = 0,01 \div 10$ dla $q = 0,1 \div 0,9$ i $K_s = 0,717$ oraz wartościach $R_e^{W(ov)} = 605$ MPa, $R_e^B = 434$ MPa, $n_W^{(ov)} = 0,15$, $n_B = 0,20$

Zgodnie z opracowaniem [3], normalizowaną wartość $K_{IR} = K_{Ith} / K_{IC}$ określimy z następujących zależności:

- dla modelu przedstawionego na rysunku 1a - $K_S = R_e^B / R_e^{W(ov)} < 1$:

$$K_{IR}^{ov} = \frac{K_{Ith}}{K_{IC}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\gamma/2} \left[b \left(R_e^{zl} K_W^{ov} \right)^{1/2} \right]^{-1} \exp \left[A \left(R_e^{zl} K_W^{ov} \right)^{1/2} - B \left(R_e^{zl} K_W^{ov} \right) \right]} \quad (12)$$

- dla modelu przedstawionego na rysunku 1b - $K_S = R_e^B / R_e^{W(un)} > 1$

$$K_{IR}^{un} = \frac{K_{Ith}}{K_{IC}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\gamma/2} \left[b \left(R_e^{zl} K_W^{un} \right)^{1/2} \right]^{-1} \exp \left[A \left(R_e^{zl} K_W^{un} \right)^{1/2} - B \left(R_e^{zl} K_W^{un} \right) \right]} \quad (13)$$

gdzie:

$$A = \frac{2(1+\nu)\bar{V}}{3RT} \left(\frac{2E}{\pi} \right)^{1/2}, \quad \left(\frac{N}{m^2} \right)^{1/2} \quad (14a)$$

$$B = \frac{2(1+\nu)\bar{V}}{RT} \frac{2}{\pi}, \quad \left(\frac{N}{m^2} \right)^{-1} \quad (15b)$$

ν - współczynnik Poissona,

\bar{V} - cząstkowa molowa objętość wodoru w metalu, $m^3 \text{ mol}^{-1}$,

R - stała gazowa, $J \text{ mol}^{-1}$,

T - temperatura, K,

- E - moduł Younga, $N\ m^{-2}$,
 σ_y - naprężenie normalne do powierzchni szczeliny, równe R_e , $N\ m^{-2}$,
 C - koncentracja wodoru w metalu, $cm^3/100g$.

Wartości K_W^{un} i K_W^{ov} określimy według następujących wzorów:

$$K_W^{un} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{4(1-q)} \left[\frac{\pi}{2} + 2(1-2q)\sqrt{q(1-q)} - \arcsin(2q-1) \right] + (1-q)\frac{1}{4\kappa} \right) \quad (16a)$$

$$K_W^{ov} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{4(1-q)} \left[-\frac{\pi}{2} - 2(1-2q)\sqrt{q(1-q)} - \arcsin(2q-1) \right] + (1-q)\frac{1}{4\kappa} \right) \quad (16b)$$

gdzie:

$$0 \leq q < 1$$

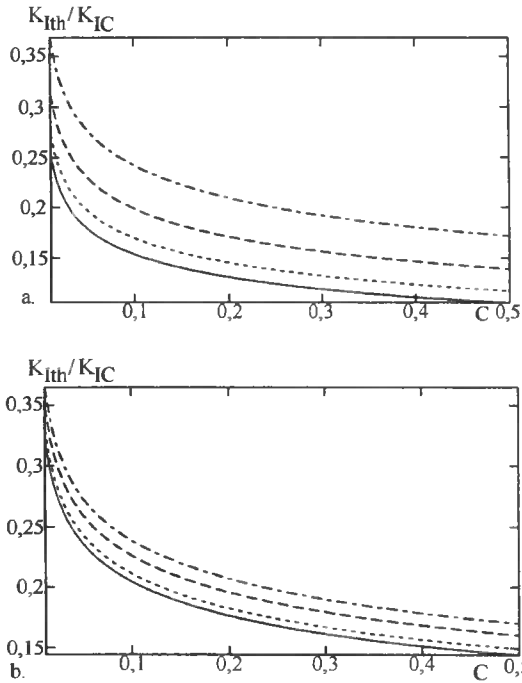
Rozpatrując praktyczne wykorzystanie powyższych ustaleń przeprowadzono ocenę K_{IR}^{ov} oraz K_{IR}^{un} stali ulepszonej cieplnie w gatunku 14HNMBCu przy wykorzystaniu następujących danych:

$$A = 6,926 \cdot 10^{-5} \left(\frac{N}{m^2} \right)^{\frac{1}{2}} ; B = 3,242 \cdot 10^{-10} \left(\frac{N}{m^2} \right)^{-1} ;$$

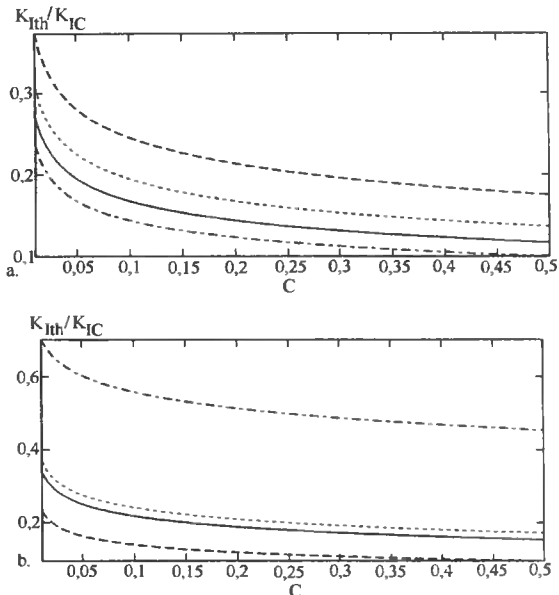
$$b = 4,7895 \cdot 10^{-5} \left(\frac{N}{m^2} \right)^{-\frac{1}{2}} ; \gamma = 0,26375 ;$$

$$\sigma_y = R_e = 9,038 \frac{N}{m^2} .$$

Rezultaty powyższych obliczeń przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Wskazują one na istnienie pewnej krytycznej wartości C_{kr} , przy której występuje radykalny spadek wartości $K_{th}/K_{IC} = f(C)$, dodatkowo potęgowany poprzez wartości $K_W^{ov} = f(\kappa, q) > 1$. W przypadku uplastycznienia materiału w sąsiedztwie wierzchołka szczeliny, najczęściej stosowane są kryteria $J_n = J_{nc}$ oraz $\delta_T = \delta_{Tc}$.



Rys. 4. Charakterystyka $K_{Ith}/K_{IC} = f(C)$ dla połączeń ze strefą o obniżonej wytrzymałości dla a. $\kappa = 0,1$, b. $\kappa = 0,5$ oraz $q = 0,1, 0,4, 0,7, 0,99$



Rys. 5. Charakterystyka $K_{Ith}/K_{IC} = f(C)$ dla połączeń ze strefą o podwyższonej wytrzymałości dla: a. $\kappa = 0,18; 0,12; 0,06; 0,01$ oraz $q = 0,46$, b. $\kappa = 0,01; 0,0008; 0,0004; 0,0003$ i $q = 0,95$

3. WNIOSKI

Przedstawione w pracy przykłady aplikacji mechaniki pękania wskazują na złożoność problemu i nieprzydatność klasycznych rozwiązań mechaniki pękania, np. do wymiarowania połączeń spawanych. Zachodzi tu konieczność modyfikacji podstawowego modelu materiału jako „continuum materialnego” o izotropowych cechach mechanicznych, niezmiennych w procesie wytwarzania konstrukcji, np. w procesie spawania lub w czasie t użytkowania konstrukcji. Działania technologiczne prowadzą najczęściej do lokalnych zmian struktury i cech mechanicznych, co w konsekwencji może prowadzić do znacznego zróżnicowania odporności na pęknięcie w spoinie lub strefie wpływu ciepła. Wskazują na to przykłady obliczeniowe, oparte na zmodyfikowanej metodyce ETM. Oceny znormalizowanej wartości rozwarcia wierzchołka szczeliny δ_R bądź odporności na pęknięcie wodorowe (zimne), wyrażone poprzez progową, znormalizowaną wartość współczynnika intensywności naprężenia $K_{IR} = K_{Ith} / K_{Ic}$.

LITERATURA

- [1] Neimitz A., 1998. Mechanika pękania. PWN Warszawa.
- [2] Ranatowski E., 2000. Constraint effect and fracture of mismatched weld joints. ECF-13. Fracture mechanics: applications and challenges, San Sebastián. Spain.
- [3] Ranatowski E., 1999. Elementy fizyki spajania metali. Wyd. ATR Bydgoszcz.

PRACTICAL MATERIALS AND CONSTRUCTIONS DIMENSIONING WITH FRACTURE MECHANICS

Summary

The paper presents practical aspects of dimensioning rules, mechanical similarity and fracture mechanics parameters and criteria and some analytical examples. The modified fracture parameters; ratio of driving forces $\delta_R = \delta_W / \delta_B$, parameters of Engineering Treatment Model (E-T-M.) and normalised value of $K_{IR} = K_{Ith} / K_{Ic}$ are given.

Keywords: fracture mechanics, structural heterogeneity, and hydrogen fracture.

OGRANICZANIE STRAT CIEPŁA W TRANSPORCIE ENERGII

Marian Szymański, Jan Łukasiewicz, Marek Szymczak

Katedra Techniki Ciepłej i Metrologii
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Przepływom płynów w rurociągach towarzyszą zmiany ich parametrów stanu oraz straty ciepła do otoczenia. Przedstawiono bilans energetyczny przepływu pary wodnej. Opisano problemy strat ciepła i sposoby ich ograniczenia poprzez stosowanie izolacji cieplnych.

Słowa kluczowe: izolacja cieplna, grubość izolacji, przewodność cieplna, materiały termoizolacyjne

1. WPROWADZENIE

Transportowi płynu w długich kanałach przepływowych towarzyszą zjawiska:

- zmian gęstości,
- spadku energii powodowanego oporami przepływu,
- spadku energii powodowanego wymianą ciepła poprzez ścianki kanału.

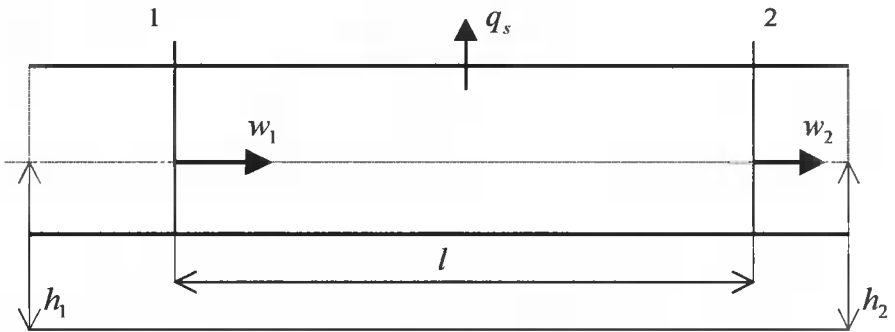
Zjawiska te wywołują zmiany parametrów stanu czynnika płynącego w kanale oraz są przyczyną strat transportowanej z czynnikiem energii.

W przypadku przepływu pary wodnej może także nastąpić zmiana stanu fazowego, czyli skraplanie się. Powodowane ono jest zmianą parametrów stanu tego czynnika wzdłuż kanału. Ich wpływ na parametry stanu transportowanego czynnika oraz warunki eksploatacyjne kanału przepływowego rozpatrzono na przykładzie przewodu (rurociągu) transportującego parę wodną.

W przewodzie, wzdłuż strumienia przepływającej pary, następują zmiany ciśnienia oraz może wystąpić zjawisko wykraplania się pary. Skraplanie się pary jest połączone z fizyczną kontrakcją objętości właściwej, co powoduje dodatkowe spadki ciśnienia czynnika.

2. BILANS ENERGETYCZNY PRZEPLYWU PARY WODNEJ

Analizę przepływu pary wodnej w długim przewodzie przeprowadzono na podstawie równania bilansu energii określonego dla kontrolnych przekrojów poprzecznych rurociągu, oddalonych od siebie odcinkiem o długości l (rys. 1).



Rys. 1. Schemat kanału przepływowego

Bilans energetyczny rozpatrywanego przewodu opisano równaniem:

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 \cdot i_1 + \dot{m}_1 \cdot \frac{w_1^2}{2} + \dot{m}_1 \cdot g \cdot h_1 = \dot{m}_2 \cdot i_2 + \dot{m}_2 \cdot \frac{w_2^2}{2} + l \cdot q_s + l \cdot l_{f1-2} + \\ + \dot{m}_2 \cdot g \cdot h_2 + \dot{m}_k \cdot i_k + \frac{\dot{m}_k \cdot w_k^2}{2} + \dot{m}_k \cdot g \cdot h_2 \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

- \dot{m}_1 - strumień masy pary przepływający przez przekrój kontrolny 1, $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$;
- i_1 - entalpia właściwa pary w przekroju kontrolnym 1, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$;
- i_2 - entalpia właściwa pary w przekroju kontrolnym 2, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$;
- w_1 - średnia prędkość przepływu pary w przekroju kontrolnym 1, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$;
- w_2 - średnia prędkość przepływu pary w przekroju kontrolnym 2, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$;
- l - długość przewodu transportowego między przekrojami kontrolnymi 1 i 2, m;
- q_s - strumień strat ciepłych przypadający na 1 m długości rurociągu, $\frac{\text{kJ}}{\text{m} \cdot \text{s}}$;
- h_1, h_2 - odległość środków powierzchni przekrojów kontrolnych od umownego poziomu, m;
- g - przyspieszenie ziemskie, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$;
- l_{f1-2} - praca wykonana przez czynnik przy pokonywaniu oporów tarcia, $\frac{\text{kJ}}{\text{m} \cdot \text{s}}$;
- \dot{m}_k - strumień masy kondensatu;

i_k - entalpia właściwa kondensatu, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$;

w_k - średnia prędkość przepływu kondensatu; $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Ze względu na stosunkowo małą wartość zmiany energii potencjalnej pary wodnej płynącej w przewodzie w równaniu bilansu energetycznego można pominąć energię potencjalną w przekrojach kontrolnych, przyjmując, że $h_1 \approx h_2$.

Równanie bilansu energetycznego przepływu pary wodnej w przewodzie po uwzględnieniu tego ma zapis:

$$\dot{m}_1 \cdot i_1 + \dot{m}_1 \cdot \frac{w_1^2}{2} = \dot{m}_2 \cdot i_2 + \dot{m}_2 \cdot \frac{w_2^2}{2} + \dot{m}_k \cdot i_k + \dot{m}_k \cdot \frac{w_k^2}{2} + l \cdot g_s + l \cdot l_{f1-2} \quad (2)$$

Równanie (1) napisano przyjmując założenie, że w przekroju kontrolnym 1-1 para nie osiągnęła stanu nasycenia i nie następuje wykraplanie się wody ($\dot{m}_k = 0$). Dla uniknięcia wykraplania się wody w parze należy stosować transport pary w stanie przegrzanym. Stan nasycenia para wodna płynąca w przewodzie może osiągnąć w wyniku strat ciepłych powodowanych przenikaniem ciepła przez ściankę przewodu.

Ilość kondensatu wykraplanego w przewodzie parowym określa równanie:

$$\dot{m}_k \cdot (i'' - i') = \dot{m}_k \cdot r = \pi \cdot k \cdot l \cdot (t_p - t_o) \approx \alpha_2 \cdot d_{i2} \cdot \pi \cdot l \cdot (t_{i2} - t_o) \quad (3)$$

gdzie:

i'' - entalpia właściwa suchej pary nasyconej, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$;

i' - entalpia właściwa wrzącej wody przy ciśnieniu i temperaturze nasycenia, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$;

r - całkowite ciepło parowania, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$;

k - współczynnik przenikania ciepła, $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$;

t_p - temperatura pary, °C;

t_o - temperatura otoczenia, °C;

α_2 - współczynnik przejmowania ciepła od zewnętrznej powierzchni izolacji do otoczenia, $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$;

d_{i2} - zewnętrzna średnica warstwy izolacji, m;

t_{i2} - temperatura zewnętrznej powierzchni warstwy izolacji, °C.

Ilość wykroplonej pary można obliczyć również ze wzoru empirycznego:

$$\dot{m}_k = 1,16 \cdot \frac{d \cdot l}{r} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4)$$

gdzie:

d, l - średnica, długość przewodu w m.

Wartość współczynnika przenikania ciepła k określona jest dla rozpatrywanego przewodu zależnością [3]:

$$\frac{1}{k} = \frac{l}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \cdot \lambda_s} + \frac{\ln \frac{d_{iz}}{d_2}}{2 \cdot \lambda_{iz}} + \frac{l}{\alpha_2 \cdot d_2} \quad (5)$$

gdzie:

α_1 - współczynnik przenikania ciepła od pary do wewnętrznej powierzchni ścianki rury, $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}}$;

d_1, d_2 - wewnętrzna i zewnętrzna średnica przewodu, m;

λ_s - przewodność cieplna stali, $\frac{\text{kJ}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}}$;

λ_{iz} - przewodność cieplna warstwy izolacji, $\frac{\text{kJ}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}}$;

d_{iz} - zewnętrzna średnica warstwy izolacji, m.

Oporo przepływu w przewodzie charakteryzuje się powodowanym przez nie spadkiem ciśnienia na jednostkowej długości przewodu. Wartość ich określana jest wzorem:

$$R = \lambda_{sr} \cdot \frac{8 \cdot \dot{m}^2}{\rho_{sr} \cdot d_1^5 \cdot \pi^2} \frac{\text{Pa}}{\text{m}} \quad (6)$$

gdzie:

λ_{sr} - współczynnik oporu;

ρ_{sr} - średnia gęstość pary, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Obliczając opory przepływu należy uwzględnić opory miejscowe w przewodzie parowym.

Wpływ cech konstrukcyjnych - średnicy, oporów przepływu, grubości warstwy izolacji cieplnej ograniczającej straty ciepła do otoczenia, oraz cech eksploatacyjnych - prędkości przepływu pary i jej parametrów na ilość powstającego w przewodzie kondensatu i strat energii czynnika przedstawiono na podstawie badań i analizy przepływu pary w rurociągu zbudowanym z dwóch odcinków o wymiarach podanych w tabeli 1.

Tabela 1. Dane techniczne rurociągu parowego

| Odcinek rurociągu | Średnica, mm | | Długość m | Grubość warstwy izolacji, mm |
|-------------------|------------------|------------------|-----------|------------------------------|
| | wewnętrzna d_1 | zewnętrzna d_2 | | |
| Odcinek 1 | 250 | 273 | 610 | 162 |
| Odcinek 2 | 200 | 223 | 635 | 162 |

Parametry pary wodnej przepływającej w rurociągu:

- na wlocie:

ciśnienie $p_1 = 1,05$ MPa,

temperatura $t_1 = 320$ °C (minimalna 235 °C),

stopień przegrzania pary $t = 138$ °C (53 °C przy $t_1 = 235$ °C),

- na wylocie:

ciśnienie $p_2 = 0,70$ MPa (minimalne $p = 0,65$ MPa).

Przegrzewanie pary zmniejsza jej gęstość i opory ruchu.

Prędkości przepływu pary w przewodach zalecane przy obliczeniach sieci parowej mają wartości:

- dla średnic $d_1 < 50$ mm, $w \leq 30$ m/s;

- dla średnic $50 \text{ mm} < d_1 < 150$ mm, $w \leq 30 \div 40$ m/s;

- dla średnic $d < 150$ mm, $w \leq 50$ m/s.

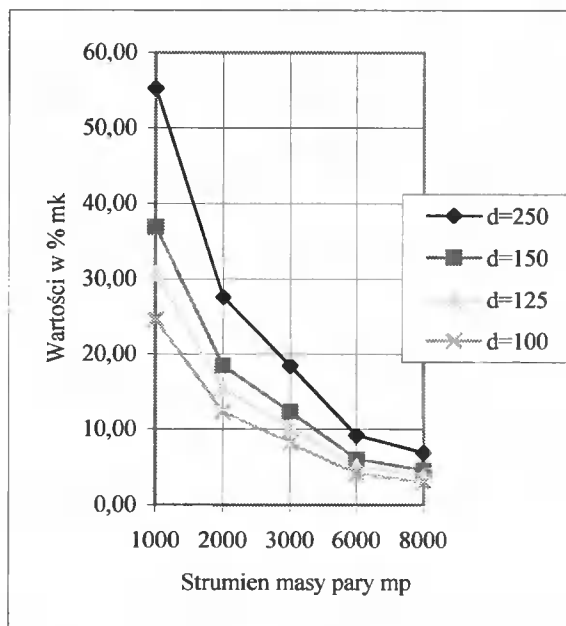
Wartości prędkości przepływu pary w przewodach przyjmuje się w granicach $30 \div 40$ m/s.

Wyniki analizy przepływu pary wodnej w badanym przewodzie oraz w przewodach o innych średnicach, dla których przeprowadzono obliczenia symulacyjne przedstawiono w tabeli 2 i na wykresach zamieszczonych na rysunku 2 i 3 [4].

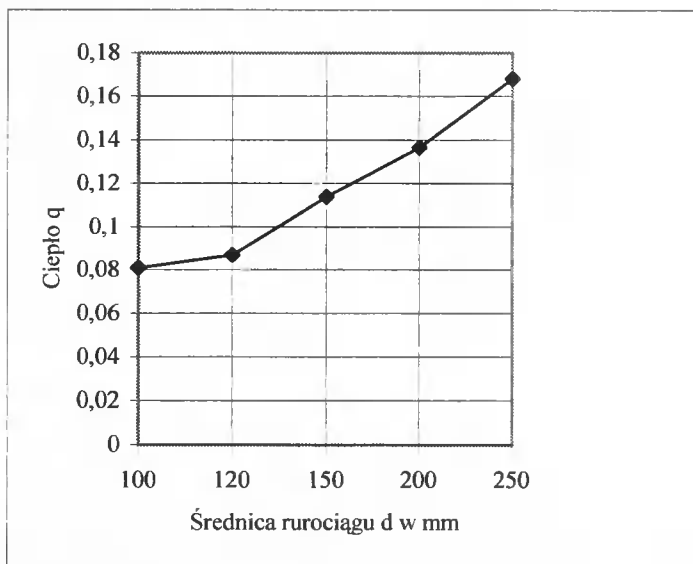
Tabela 2. Ilość kropli wyrażona w % strumienia masy pary dolotowej powstających w przewodzie parowym przy różnych jego średnicach

| Strumień masy pary kg/h | Wymiary średnic przewodu, mm | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|
| | 250 I odcinek 200 II odcinek | 150 | 125 | 100 |
| 8000 | 6,9 | 4,6 | 3,8 | 3,0 |
| 6000 | 9,2 | 6,1 | 5,1 | 4,1 |
| 3000 | 18,41 | 12,30 | 10,25 | 8,2 |
| 2000 | 27,60 | 18,45 | 15,38 | 12,30 |
| 1000 | 55,23 | 36,90 | 30,76 | 24,60 |

Z przytoczonych danych wynika, że przy średnicach przewodu 250 i 200 mm i przepływach $6 \div 8$ Mg/h przegrzanej pary ilość wykopłonej wody nie przekracza 10 % strumienia masy pary, a więc przyjmowanej w obliczeniach wartości nadatku strumienia masy pary.



Rys. 2. Zależność między ilością \dot{m}_k kondensatu a strumieniem \dot{m} masy pary dla różnych średnic przewodu parowego



Rys. 3. Zależność między stratami ciepła q przypadającymi na długości 1 m przewodu i średnicą nominalną przewodu d

3. IZOLACJA CIEPLNA

Ograniczenie strat ciepłych powodowanych przenikaniem ciepła do otoczenia mających znaczący wpływ na zmianę stanu transportowanego czynnika osiąga się zwiększając opór cieplny ścianki przewodu. Materiały izolacyjne, obok możliwie małych wartości przewodności cieplnej, muszą spełniać szereg wymagań, do których należą:

- mały koszt inwestycyjny i eksploatacyjny,
- duża trwałość,
- odporność na działanie wilgoci,
- zachowanie stałości przewodności cieplnej λ ,
- brak korodującego oddziaływania na materiał ścianki przewodu,
- ekologiczność.

Do materiałów termoizolacyjnych zalicza się materiały, których przewodność cieplna jest nie większa niż $0,175 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ w temperaturze 20°C , a gęstość pozorna nie

przekracza $400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Materiały te mają strukturę porowatą i zbudowane są z substancji

stałej zawierającej pory, kapilary lub przestrzenie między włóknami wypełnione powietrzem, którego przewodność cieplna wynosi $0,024 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$. W przypadku zawilgocenia

materiału termoizolacyjnego pory wypełnia woda, której przewodność cieplna jest równa $0,56 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$, co powoduje zmniejszenie oporu cieplnego materiału. Substancja stała

tworząca szkielet materiału termoizolacyjnego może być nieorganiczna lub organiczna, a struktura jej krystaliczna lub amorficzna. Stanowi ona mostki cieplne przewodzące ciepło. Substancje pochodzenia organicznego mają przy strukturze amorficznej wartości przewodności cieplnej zawarte w granicach $0,3 \div 0,4 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$.

Substancje nieorganiczne przy takiej samej strukturze mają przewodności cieplne prawie dziesięciokrotnie wyższe, zawarte w granicach $2,9 \div 3,3 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$.

W tabeli 3 podano przykładowo właściwości materiałów termoizolacyjnych stosowanych do izolacji cieplnej rurociągów transportujących czynniki grzewcze [5].

Tabela 3. Materiały termoizolacyjne

| Rodzaj materiału termoizolacyjnego | Pozorna gęstość kg/m^3 | Współczynnik przewodzenia ciepła λ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ | | Maksymalna temperatura $^\circ\text{C}$ | Uwagi |
|------------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------------|---|--------------------|
| | | $t = 50^\circ\text{C}$ | $t = 100^\circ\text{C}$ | | |
| Wata szklana | 100 | 0.034 | 0.042 | 450.0 | |
| Wata zużłowa (wełna mineralna) | 225 | 0.041 | 0.046 | 800.0 | zaw. siarki 4 g/kg |
| Tworzywa Poliuretanowe | 40 | 0.042 | 0.050 | 150.0 | |
| Tworzywa kauczukowe HT (Armaflex) | | 0.040 $t = 0^\circ\text{C}$ | 0.05 $t = 40^\circ\text{C}$ | 175.0 | |

Na bazie materiałów termoizolacyjnych wytwarzane są, z zastosowaniem różnorodnych modyfikacji, otuliny izolacyjne rur oraz wykonywane izolacje rur preizolowanych.

4. WYMIAROWANIE IZOLACJI

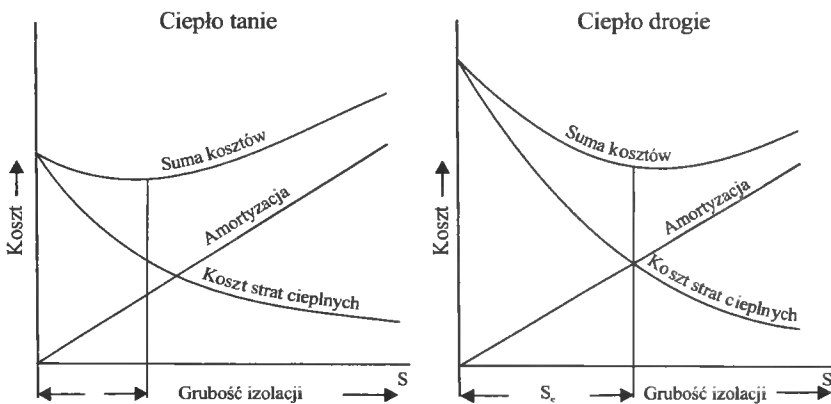
Warunkiem spełniania przez izolację cieplną rurociągu podstawowego jej zadania - ograniczania ilości ciepła przenikającego od czynnika płynącego w przewodzie do otoczenia jest to, aby zewnętrzna średnica d_z warstwy izolacji była większa od średnicy krytycznej d_{kr} , dla której opór cieplny izolacji osiąga minimum. Średnicę krytyczną określa zależność:

$$\frac{\partial R_c}{\partial d_z} = 0 \quad (7)$$

Obliczona z niej wartość $d_z = d_{kr}$ jest wyrażona wzorem:

$$d_{kr} = \frac{2 \cdot \lambda}{\alpha_z} \quad (8)$$

Ekonomiczną grubość warstwy izolacji oblicza się na podstawie sumy kosztów amortyzacji i strat ciepłych przyjmując, że suma ta ma wartość minimum. Zasadę doboru ekonomicznej grubości izolacji przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wykreślne wyznaczanie ekonomicznej grubości izolacji

Ze względu na trudności obliczania ekonomicznej grubości izolacji powodowane zmiennością kosztów paliwa, racjonalną grubość warstwy izolacji oblicza się na podstawie maksymalnych dopuszczalnych wartości jednostkowych strat ciepła. Wartości te dla niektórych średnic przewodów podano w tabeli 4 [2].

Tabela 4. Maksymalne dopuszczalne wartości jednostkowych strat ciepła q, W/m

| D _{nom} rurociągu mm | Maksymalna obliczeniowa temperatura czynnika, °C | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| | 200 | 180 | 150 | 130 | 110 | 90 | 70 | 50 |
| 20 | 47 | 40 | 34 | 30 | 26 | 20 | 16 | 10 |
| 25 | 51 | 45 | 37 | 33 | 29 | 23 | 18 | 11 |
| 32 | 56 | 49 | 40 | 34 | 30 | 26 | 20 | 13 |
| 40 | 59 | 51 | 43 | 36 | 32 | 28 | 22 | 14 |
| 50 | 63 | 55 | 46 | 41 | 36 | 31 | 24 | 15 |
| 65 | 71 | 62 | 51 | 46 | 40 | 34 | 26 | 16 |
| 80 | 75 | 64 | 53 | 47 | 42 | 36 | 29 | 17 |
| 100 | 83 | 71 | 60 | 52 | 47 | 39 | 33 | 19 |
| 125 | 90 | 77 | 65 | 55 | 50 | 41 | 35 | 20 |
| 150 | 96 | 85 | 72 | 63 | 54 | 46 | 39 | 22 |
| 200 | 113 | 97 | 81 | 71 | 63 | 52 | 41 | 24 |
| 250 | 131 | 112 | 94 | 83 | 73 | 60 | 48 | 29 |
| 300 | 142 | 122 | 102 | 88 | 76 | 65 | 55 | 30 |
| 350 | 152 | 129 | 109 | 94 | 82 | 68 | 57 | 32 |
| 400 | 160 | 134 | 110 | 97 | 84 | 69 | 59 | 36 |
| 450 | 169 | 146 | 121 | 104 | 90 | 74 | 63 | 39 |
| 500 | 176 | 151 | 125 | 106 | 93 | 77 | 65 | 40 |
| 600 | 195 | 165 | 135 | 117 | 102 | 81 | 69 | 46 |
| 700 | 212 | 182 | 147 | 129 | 109 | 88 | 70 | 52 |
| 800 | 236 | 204 | 164 | 144 | 122 | 99 | 79 | 58 |
| 900 | 251 | 214 | 173 | 152 | 127 | 104 | 85 | 60 |
| 1000 | 275 | 234 | 190 | 165 | 138 | 111 | 93 | 65 |
| 1200 | 309 | 271 | 219 | 190 | 158 | 127 | 104 | 72 |
| 1400 | 340 | 290 | 241 | 210 | 176 | 132 | 108 | 74 |

Grubość warstwy izolacji dla przewodów o przekroju kołowym oblicza się z zależności [2]:

$$\delta_o = \frac{d_z}{2}(C - 1) \quad (9)$$

gdzie:

d_z - średnica zewnętrzna izolowanego przewodu, m.

Wyraz C ma wartość:

$$\ln C = \frac{\pi \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \lambda_{tm} \cdot (t_c - t_o)}{q} \quad (10)$$

gdzie:

k_1 - współczynnik korekcji uwzględniający usytuowanie przewodu,

k_2 - współczynnik korekcji uwzględniający wpływ na wymianę ciepła konstrukcji wsporczych rurociągu.

Zalecane wartości współczynnika korekcji k_1 podano w tabeli 5 [2].

Tabela 5. Zalecane wartości współczynnika korekcji k_1 [2]

| Miejsce usytuowania rurociągu lub urządzenia | Maksymalna obliczeniowa temperatura czynnika, °C | | | | | | |
|--|--|------|------|------|------|------|------------|
| | 200 | 180 | 150 | 130 | 110 | 90 | poniżej 90 |
| w kanale nieprzechodnim | 1,95 | 1,94 | 1,93 | 1,92 | 1,91 | 1,90 | 1,88 |
| wewnątrz budynku lub w tunelu zbiorczym | 1,95 | 1,94 | 1,93 | 1,92 | 1,91 | 1,90 | 1,86 |
| na zewnątrz budynku (napowietrznie) | 1,98 | 1,98 | 1,97 | 1,96 | 1,95 | 1,95 | 1,67 |

Współczynnik korekcji k_2 przyjmuje się równy:

$k_2 = 1,06$ dla izolacji wymagającej zastosowania konstrukcji wsporczych,

$k_2 = 1,0$ dla izolacji bez konstrukcji wsporczych.

Wartość przewodności cieplnej λ_{tm} materiału termoizolacyjnego dla średniej temperatury t_m należy odczytać z tablic lub można obliczyć ze wzoru:

$$\lambda_{tm} = \lambda_{tp} + m \cdot (t_m - t_p) \quad (11)$$

gdzie:

λ_{tp} - przewodność cieplna materiału termoizolacyjnego określona w temperaturze

t_p , W/m · K;

m - współczynnik uwzględniający wpływ temperatury na wartość przewodności cieplnej materiału termoizolacyjnego, W/m · K²; wartość m przyjmuje się równą:

$m = 0,00023$ W/m · K² - dla materiałów termoizolacyjnych włóknistych,

$m = 0,00012$ W/m · K² - dla materiałów termoizolacyjnych porowatych;

t_m - średnia temperatura izolacji, °C, określa ją zależność:

$$t_m = \frac{t_c + t_e}{2}$$

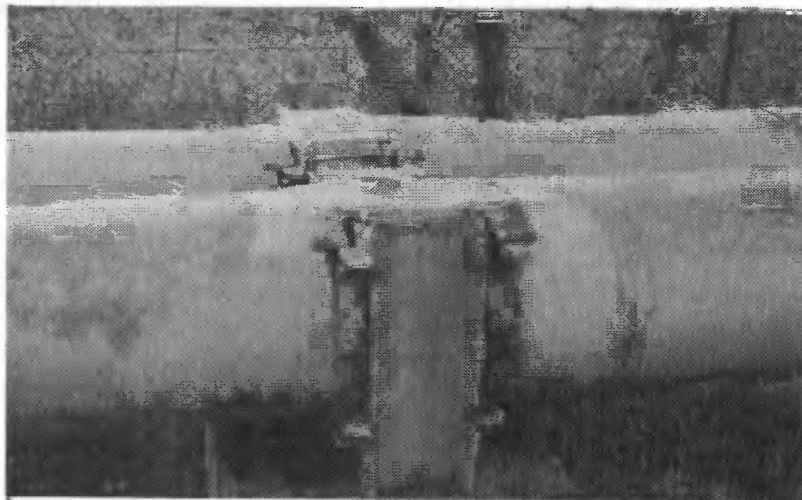
t_c - maksymalna temperatura obliczeniowa czynnika płynącego w przewodzie, °C;

t_e - temperatura na zewnętrznej powierzchni izolacji, °C;

$$t_e = t_o + 4^\circ\text{C}$$

t_o - temperatura otoczenia, °C.

Projektując izolację cieplną przewodu transportującego czynnik grzewczy - gorącą wodę lub parę wodną - należy uwzględnić, że znaczne ilości ciepła mogą być tracone poprzez przewodzenie przez mostki cieplne, które stanowią niewłaściwie zaprojektowane i nieizolowane ciepłnice podpory (zdjęcie na rys. 5).



Rys. 5. Nieizolowane ciepnie podpory [1]

5. WNIOSKI

1. Straty ciepłne przy transporcie energii ciepłnej w długich przewodach zależą od parametrów przepływu czynnika unoszącego energię oraz od oporu ciepłnego ścianki przewodu.
2. Ograniczenie strat ciepłnych przy przepływie pary wodnej można uzyskać dobierając odpowiednią prędkość przepływu pary oraz grubość izolacji ciepłnej i rodzaj materiału termoizolacyjnego. Prędkość przepływu określona jest dla danego strumienia masy pary doбором średnicy wewnętrznej przewodu.
3. Przedstawiony sposób obliczenia racjonalnej grubości warstwy materiału termoizolacyjnego jest przybliżony i wymaga korekt waters dopuszczalnych maksymalnych jednostkowych strat ciepła.

LITERATURA

- [1] Katalogi firm ARMSTRONG, ISOVER, IZOTERM.
- [2] PN-85/B-02421 Izolacja ciepłna rurociągów, armatury i urządzeń. Wymagania i badania.
- [3] Praca zbiorowa, 1993. Pomiary ciepłne. Cz. I i II, WNT Warszawa.
- [4] Szymański M., Łukasiewicz J., Szymczak M., 1997. Analiza warunków eksploatacji sieci parowej. ATR Bydgoszcz (praca niepublikowana).
- [5] Szymański M., Łukasiewicz J., Szymczak M., 1998. Ćwiczenia laboratoryjne z Techniki Ciepłnej. Wprowadzenie do ćwiczeń. ATR Bydgoszcz.

HEAT LOSS LIMITATION IN ENERGY TRANSPORT

Summary

Liquid flow in pipelines is accompanied by changes in their state parameters and by heat losses. The water steam flow energy balance has been described. Problems of heat losses are given together with methods to limit the losses with heat insulation.

Keywords: thermal insulation, insulation thickness, thermal conductivity, heat-insulating materials

WENTYLACJA HALI MASZYNY PAPIERNICZEJ

Marian Szymański

Zakład Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pracy przeprowadzono analizę wymiany masy i ciepła w procesie wentylacji hali maszyny papierniczej. Przedstawiono układ wentylacji hali oraz organizację wymiany powietrza.

Słowa kluczowe: papier, maszyna papiernicza

1. WPROWADZENIE

Obróbka i wymiana powietrza w hali maszyny papierniczej związana jest ściśle z procesem formowania wstęgi wytworu papierniczego. Wentylacja hali winna zapewnić nie tylko odpowiednie warunki klimatyczne dla obsługi maszyny, lecz również utrzymywać w całej hali stan powietrza odległy od punktu rosy, tak aby przy kontakcie z powierzchniami o niższej temperaturze nie wykraplała się z niego para wodna.

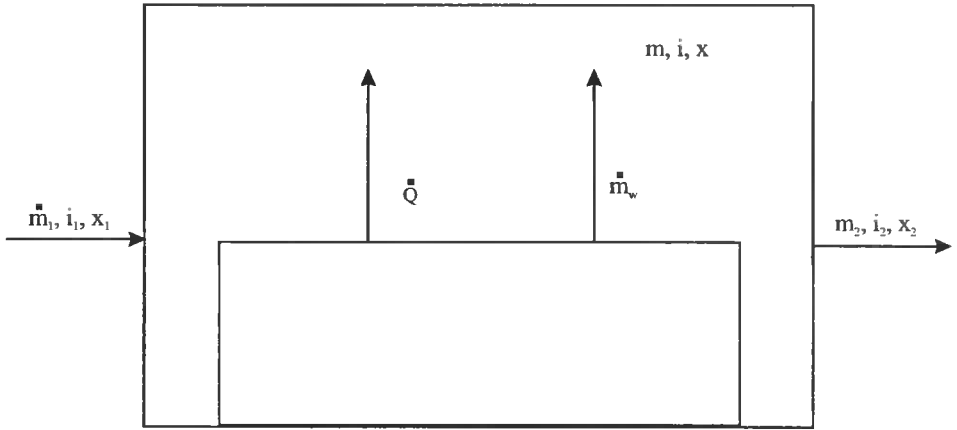
W hali maszyny papierniczej zachodzi parowanie powierzchniowe wody. Występuje ono w części mokrej maszyny oraz może odbywać się z powierzchni posadzki hali, gdzie niejednokrotnie woda rozlewana jest przypadkowo lub przy czynnościach porządkowych.

Powietrze przepływające przez halę maszyny winno odprowadzać odparowującą w niej wodę. Wraz z parą wodną od powietrza odprowadzane są znaczne ilości ciepła. Powietrze przejmuje również ciepło od powierzchni osłony suszarki, silników elektrycznych grup napędowych maszyny, wstęgi papieru na nawijaku i gładziku maszyny, a także wymienia ciepło ze ścianami budynku hali.

Instalacja wentylacyjna hali maszyny papierniczej stanowi integralną część układu rekuperacji ciepła w suszarce maszyny papierniczej.

2. ANALIZA PRZEPIYWU MASY I CIEPŁA W HALI MASZYNY

Przepływ masy i ciepła w hali maszyny papierniczej przedstawiono na schemacie zamieszczonym na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat przepływu masy i ciepła w hali maszyny papierniczej

\dot{m}_1 - strumień masy powietrza doprowadzonego do hali, kg/s; i_1 - entalpia właściwa doprowadzanego powietrza, kJ/kg; x_1 - wilgotność właściwa doprowadzanego powietrza, kg/kg; m - masa powietrza w hali maszyny, kg; i - entalpia właściwa powietrza w hali, kJ/kg; x - wilgotność właściwa powietrza w hali, kg/kg; \dot{m}_2 - strumień masy powietrza wywiewanego z hali, kg/s; i_2 - entalpia właściwa powietrza wywiewanego z hali, kJ/kg; \dot{m}_w - strumień masy wody wyparowującej w hali, kg/s; \dot{Q} - strumień ciepła doprowadzanego w hali do powietrza, kW

Dla nieskończenie krótkiego czasu $d\tau$ bilans przepływu masy w hali opisuje równanie (1):

$$\dot{m}_{g1} \cdot x_1 \cdot d\tau + \dot{m}_w \cdot d\tau - \dot{m}_{g2} \cdot x_2 \cdot d\tau = m_g \cdot dx \quad (1)$$

gdzie:

$\dot{m}_{g1}, \dot{m}_{g2}$ - strumienie mas suchego powietrza nawiewanego do hali i z niej wywiewanego

$$\dot{m}_{g1} = \frac{\dot{m}_1}{1 + x_1} \quad \dot{m}_{g2} = \frac{\dot{m}_2}{1 + x_2}$$

m_g - masa powietrza suchego w hali w kg

$$m_g = \frac{m}{1 + x}$$

Przyjmując założenie, że strumienie mas suchego powietrza nawiewanego do hali i z niej wywiewanego są równe $\dot{m}_{g1} = \dot{m}_{g2} = \dot{m}_g$ oraz że równe są wartości wilgotności właściwych powietrza w hali i powietrza wywiewanego $x_2 = x$, równanie (1) napisano w postaci:

$$\dot{m}_g \cdot x_1 \cdot d\tau + \dot{m}_w \cdot d\tau - \dot{m}_g \cdot x \cdot d\tau = m_g \cdot dx \quad (2)$$

Po rozdzieleniu zmiennych otrzymano zależność:

$$\frac{dx}{\dot{m}_w - \dot{m}_g \cdot (x - x_1)} = \frac{d\tau}{m_g} \quad (3)$$

Wilgotność właściwa powietrza nawiewanego do hali ma w chwili τ wartość stałą x_1 . Różniczkę wilgotności właściwej dx można przedstawić zależnością:

$$dx = d(x - x_1)$$

Po wprowadzeniu tej wartości do wzoru (3) otrzymano zależność:

$$\frac{d(x - x_1)}{\dot{m}_w - \dot{m}_g \cdot (x - x_1)} = \frac{d\tau}{m_g} \quad (4)$$

Po scałkowaniu otrzymano równanie:

$$-\frac{1}{\dot{m}_g} \cdot \ln[\dot{m}_w - \dot{m}_g \cdot (x - x_1)] + C_1 = \frac{\tau}{m_g} \quad (5)$$

Zakładając, że dla $\tau = 0$ wilgotność właściwa powietrza w hali jest równa x_0 oraz oznaczając iloraz $\frac{\dot{m}_g}{m_g}$ określający wielokrotność wymian powietrza w pomieszczeniu przez n , otrzymano po wyznaczeniu wartości stałej całkowania C_1 równanie:

$$\dot{m}_w - \dot{m}_g \cdot (x - x_1) = \dot{m}_w - \dot{m}_g \cdot (x_0 - x_1) \cdot e^{-n \cdot \tau} \quad (6)$$

opisujące bilans masowy powietrza w hali maszyny papierniczej.

Równanie bilansu cieplnego opisujące wymianę ciepła w hali maszyny uzyskano w analogiczny sposób jak równanie bilansu masowego. Dla nieskończonego krótkiego czasu $d\tau$ bilans ciepła hali opisuje równanie:

$$\dot{m}_{g1} \cdot i_1 \cdot d\tau + \dot{Q} \cdot d\tau - \dot{m}_{g2} \cdot i_2 \cdot d\tau = \dot{m}_g \cdot di \quad (7)$$

Na podstawie tego równania otrzymano zależność:

$$\dot{Q} - \dot{m}_g \cdot (i - i_1) = \dot{Q} - \dot{m}_g (i_0 - i_1) \cdot e^{-n \cdot \tau} \quad (8)$$

Równania bilansu masowego i bilansu cieplnego mają charakter wykładniczy. Określają one zmianę parametrów powietrza w hali w zależności od czasu τ .

Strumień masy wody \dot{m}_w odparowującej w hali maszyny można obliczyć ze wzoru Daltona:

$$\dot{m}_w = F \cdot \beta \cdot (p_{pn} - p_p) \cdot \frac{p}{p_b} \cdot \frac{kg}{h} \quad (9)$$

gdzie:

- F - powierzchnia parowania, m^2 ;
- β - współczynnik parowania, $kg/m^2 \cdot h \cdot Tr$;

p_{pn} - ciśnienie cząstkowe pary nad powierzchnią wody, Tr;

p_p - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w otoczeniu, Tr;

p - ciśnienie atmosferyczne normalne $p = 760$ Tr;

p_b - ciśnienie atmosferyczne, Tr.

Wartość współczynnika parowania oblicza się ze wzoru:

$$\beta = 0,0229 + 0,0174 \cdot w_p \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Tr}} \right] \quad (10)$$

gdzie:

w_p - prędkość przepływu powietrza nad powierzchnią parowania, m/s.

Orientacyjną wartość strumienia masy wody odparowanej w części mokrej maszyny można obliczyć stosując empiryczny wskaźnik a , uzależniający ilość odparowanej wody od strumienia masy \dot{m}_s wody odparowanej w suszarce

$$\dot{m}_w = a \cdot \dot{m}_s \quad (11)$$

Wartość wskaźnika a przyjmuje się równy 0,15. Na podstawie obliczonej wartości strumienia masy wody odparowanej w części mokrej maszyny określa się zapotrzebowanie powietrza do wentylacji hali maszyny.

Strumień masy \dot{m}_{g1} suchego powietrza potrzebnego do odprowadzania wody odparowującej w hali maszyny ma wartość:

$$\dot{m}_{g1} = \frac{\dot{m}_w}{x_2 - x_1} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad (12)$$

Wartość strumienia masy wilgotnego powietrza nawiewanego do hali maszyny jest równa:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{g1} (1 + x_1) \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad (13)$$

Część powietrza nawiewanego do hali - około 10 % - doprowadzana jest przez międzystropie usytuowane nad częścią mokrą maszyny.

Do hali maszyny doprowadzana jest pewna ilość powietrza dostarczanego do chłodzenia silników elektrycznych grup napędowych maszyny.

Bilans cieplny powietrza w hali maszyny papierniczej opisuje równanie [1]:

$$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5 + \dot{Q}_6 + \dot{Q}_7 = \dot{Q}_8 + \dot{Q}_9 \quad (14)$$

gdzie:

\dot{Q}_1 - strumień ciepła doprowadzany z powietrzem nawiewanym bezpośrednio do hali, $\dot{Q}_1 = 52$ %;

\dot{Q}_2 - strumień ciepła doprowadzany z powietrzem nawiewanym z międzystropia, $\dot{Q}_2 = 7,1$ %;

- \dot{Q}_3 - strumień ciepła doprowadzany z powietrzem chłodzącym silniki, $\dot{Q}_3 = 4,94 \%$;
- \dot{Q}_4 - strumień ciepła doprowadzany od gładzika i nawijaka maszyny, $\dot{Q}_4 = 5,41 \%$;
- \dot{Q}_5 - strumień ciepła doprowadzany od wstęgi papieru, $\dot{Q}_5 = 1,97 \%$;
- \dot{Q}_6 - strumień ciepła doprowadzany od osłony suszarki, $\dot{Q}_6 = 2,87 \%$;
- \dot{Q}_7 - strumień ciepła doprowadzany z wodą odparowującą w części mokrej, $\dot{Q}_7 = 25,71 \%$;
- \dot{Q}_8 - strumień ciepła doprowadzanego z powietrzem wywiewanym z hali, $\dot{Q}_8 = 92,2 \%$;
- \dot{Q}_9 - strumień strat ciepłych budynku, $\dot{Q}_9 = 7,8 \%$.

Przy objaśnieniach przykładowo podano procentowe udziały poszczególnych składników w bilansie cieplnym hali maszyny wytwarzającej karton przy temperaturze powietrza zewnętrznego $t_z = -20^\circ\text{C}$, wilgotności właściwej powietrza zewnętrznego $x = 0,7\text{g/kg}$, temperaturze powietrza nawiewanego z międzystropia $t_{1m} = 40^\circ\text{C}$.

Odnosząc równanie bilansu cieplnego do okresu zimy, przyjmuje się temperaturę powietrza zewnętrznego odpowiadającą strefie klimatycznej, w której zlokalizowana jest rozpatrywana maszyna papiernicza.

Temperatura powietrza nawiewanego bezpośrednio do hali winna wynosić 20°C , a powietrza nawiewanego do międzystropia 40°C .

Temperatura powietrza wywiewanego z hali wynosić winna $\sim 25^\circ\text{C}$.

Wartość strumienia ciepła doprowadzanego do hali z nawiewanym do niej powietrzem jest równa sumie strumieni $\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3$:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_{g1n} \cdot i_1 \quad (15)$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_{g1m} \cdot i_{1m} \quad (16)$$

$$\dot{Q}_3 = \dot{m}_{g3} \cdot i_o \quad (17)$$

gdzie:

- \dot{m}_{g1n} - strumień masy powietrza suchego nawiewanego bezpośrednio do hali,
- \dot{m}_{g1m} - strumień masy powietrza suchego nawiewanego z międzystropia,
- i_{1m} - entalpia właściwa powietrza nawiewanego z międzystropia,
- \dot{m}_{g3} - strumień masy suchego powietrza doprowadzanego bezpośrednio do chłodzenia silników,
- i_o - entalpia właściwa powietrza zewnętrznego.

Ciepło potrzebne do podgrzania powietrza nawiewanego do hali doprowadzane jest w wymiennikach rekuperacji ciepła zainstalowanych przy suszarce maszyny. Strumień tego ciepła ma wartość:

$$\dot{Q}_{tr} = (\dot{m}_{g1n} + \dot{m}_{g1m}) \cdot (i_1 - i_o) + \dot{m}_{g1m} \cdot (i_{1m} - i_1) \quad (18)$$

Do chłodzenia silników doprowadzane jest powietrze zewnętrzne o entalpii i_o . Pobiera ono od silników strumień ciepła \dot{Q}_3 równy:

$$\dot{Q}_3 = N \cdot (1 - \eta_s) \quad (19)$$

gdzie:

N - suma mocy silników,

η_s - sprawność silników.

Zapotrzebowanie powietrza do chłodzenia silników oblicza się ze wzoru:

$$\dot{m}_{g,3} = \frac{\dot{Q}_3}{i_t - i_o} \quad (20)$$

Temperatura wody na powierzchni sita i filców jest wyższa niż temperatura powietrza w hali. Parowanie wody w części mokrej maszyny połączone jest z przepływem ciepła od wody do powietrza, aż do osiągnięcia granicznej temperatury chłodzenia. Wartość strumienia ciepła doprowadzanego w wyniku parowania wody jest równa:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_w (r_{0^\circ C} + c_{pw} \cdot t) = \dot{m}_w (2500 + 1,97 \cdot t) \quad (21)$$

gdzie:

r - ciepło parowania wody w temperaturze $0^\circ C$, $r = 2500$ kJ/kg.

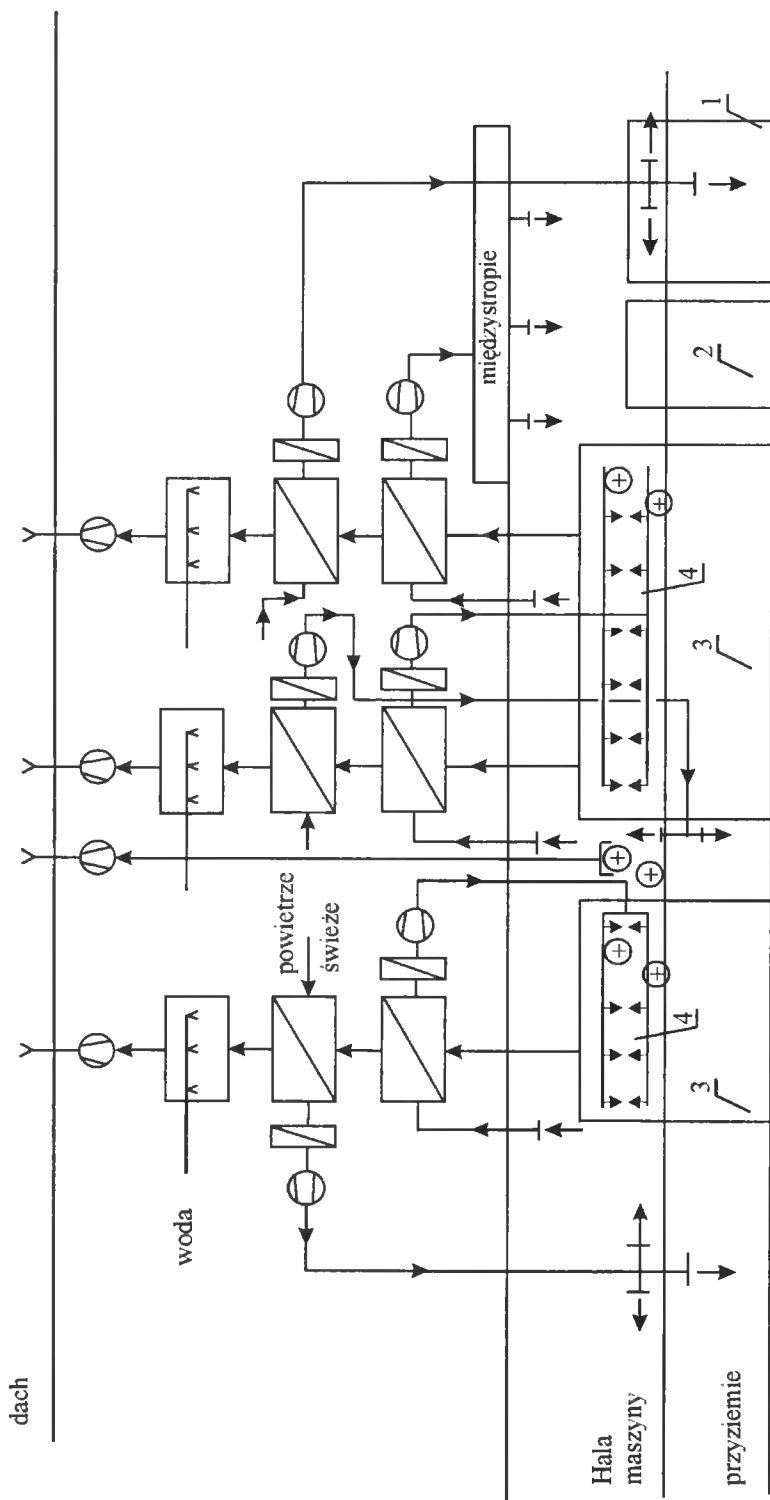
3. ORGANIZACJA WYMIANY POWIETRZA W HALI MASZYNY PAPIERNICZEJ

Opary odprowadzane z suszarki maszyny papierniczej mają temperaturę $70 \div 80^\circ C$ i wilgotność względną 30 %.

Schemat instalacji rekuperacji ciepła i wentylacji hali maszyny papierniczej przedstawiono na rysunku 2.

Rekuperacja ciepła od oparów odprowadzanych z suszarki maszyny papierniczej jest przeprowadzana w trójstopniowych zespołach wymienników ciepła. W pierwszych dwóch stopniach instalowane są płytowe wymienniki. Trzeci stopień tworzą wymienniki bezprzeponowe, w których ciepło odprowadzane jest do wody natryskiwanej bezpośrednio do oparów.

Wymienniki pierwszych stopni podgrzewają powietrze wywiewane z hali. W wymienniku pierwszego stopnia pierwszego zespołu powietrze podgrzane do $45^\circ C$ jest podgrzewane następnie w nagrzewnicy parowej do temperatury około $70^\circ C$ i nawiewane pod filce suszarkowe pierwszej grupy cylindrów suszących.



Rys. 2. Schemat instalacji wentylacyjnej hali maszyny papierniczej; 1 - część sitowa, 2 - część prasowa, 3 - suszarka, 4 - wałki nadmuchowe prowadzące suszarki

W wymiennikach drugiego i trzeciego zespołu rekuperacyjnego powietrze podgrzewane jest do temperatury 45°C, a następnie w nagrzewnicach parowych do temperatury około 120°C i tłoczone wentylatorami do wałków przedmuchowych suszników.

Powietrze do wentylacji hali maszyny papierniczej jest przygotowane w wymiennikach ciepła drugiego stopnia. Doprowadzane jest do nich poprzez filtry powietrze świeże. Podgrzewane jest ono do temperatury 20°C i nawiewane do hali. Przy wymiennikach instalowane są parowe nagrzewnice powietrza umożliwiające podgrzewanie dodatkowo nawiewanego powietrza. Powietrze podgrzane w wymienniku pierwszego zespołu rekuperacyjnego w nagrzewnicy podnosi swoją temperaturę do 45°C i jest tłoczone wentylatorem do międzystropia, skąd poprzez anemostaty w stropie przepływa do hali nad częścią moką maszyny.

Organizacja wymiany powietrza w hali maszyny papierniczej spełnia przede wszystkim zadania związane z procesem technologicznym wytwarzania papieru. Stosowanie międzystropia nad częścią moką maszyny i nawiewanie powietrza o temperaturze około 45°C w strefie tej części zabezpiecza przed osiągnięciem przez powietrze stanu punktu rosy i wykraplaniem się pary wodnej oraz powstawaniem zamglenia hali.

W części mokrej, a zwłaszcza w strefie sitowej odparowuje stosunkowo dużo wody. Wykraplanie się pary wodnej z powietrza może powodować trudności ruchowe, polegające na uszkodzeniach wstęgi papieru formowanej na sicie maszyny przez opadające na nią krople wody. Organizacja wymiany powietrza w tej strefie hali odbywa się w układzie „góra-góra”.

Powietrze kierowane do hali bezpośrednio jest nawiewane poprzez nawiewniki zlokalizowane nad posadzką, a jego część dostarczana jest do przyziemia maszyny nawiewnikami znajdującymi się pod jego stropem.

4. WNIOSKI

Zastosowanie, po uprzednim podgrzaniu, powietrza wywiewanego z hali maszyny do suszenia wstęgi papieru w suszarce umożliwia uzyskanie dodatkowej oszczędności ciepła.

Ciepło doprowadzane do powietrza w hali maszyny jest dzięki temu zawrócone do procesu technologicznego wytwarzania papieru.

Duże znaczenie dla skuteczności wentylacji hali maszyny papierniczej ma organizacja wymiany w niej powietrza. Powietrze nawiewane winno być kierowane bezpośrednio do obszarów hali, gdzie występuje szczególnie duże parowanie powierzchniowe wody.

Powietrze o stosunkowo dużej wilgotności względnej, zanieczyszczone cząstkami klejów, odprowadzane znad prasy zaklejającej, winno być wyłączone z obiegu recyrkulacji w urządzeniach rekuperacyjnych.

LITERATURA

- [1] Szymański M., 1986. Badania części suszącej wraz z rekuperacją ciepła I maszyny papierniczej w ZCP w Kwidzynie. ATR Bydgoszcz, praca niepublikowana.

PAPER-PROCESSING MACHINE - PAPER ROOM VENTILATION

Summary

The study analyses pulp and heat exchanging in paper-processing machine paper room ventilation.

The hall ventilation system and air exchanging are also described.

Keywords: paper, paper-processing machine

ASPEKTY ENERGETYCZNE I TECHNOLOGICZNE RECYCLINGU MAKULATURY

Marian Szymański

Zakład Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W artykule rozpatrzono zmiany struktury włókien masy celulozowej powstające w procesie technologicznym wytwarzania wytworów papierniczych. Przeprowadzono analizę ich wpływu na zużycie energii do przygotowania masy papierniczej z makulatury.

Słowa kluczowe: przemysł papierniczy, recycling makulatury

1. WPROWADZENIE

Włókna masy celulozowej pozyskiwane z makulatury ulegają znacznym zmianom struktury i postaci spowodowanym poprzednią obróbką, a później zjawiskami na nie oddziaływanymi podczas konsolidacji wstęgi włóknistej na maszynie papierniczej. Kolejne zawrócenia do produkcji masy makulaturowej pogłębiają degradację włókien.

Rozpatrując następujące po sobie operacje przygotowania masy papierniczej stwierdza się, że każda z nich powoduje powstawanie określonych zmian fizycznych i chemicznych w strukturze włókien masy celulozowej i wymaga doprowadzenia odpowiedniej ilości energii.

Rozczynianie pierwotnej masy celulozowej w rozwłókniaczach wirowych (hydro-pulperach) nie powoduje zmian w strukturze włókien. Masa rozdzielana jest na pęczki włókien i większe ich skupiska. Woda nie przenika do międzyfibrylarnych obszarów ścianek włókien, wypełniając jedynie lumeny. Włókna z masy makulaturowej w wyniku poprzedniej obróbki ulegały skróceniu, fibrylacji zewnętrznej i wewnętrznej oraz ubytkowi rozpuszczających się w wodzie składników chemicznych. Podczas suszenia włókna ulegają skurczowi. Powstaje na nich warstewka zrogowacia, usztywniająca włókno i utrudniająca dostęp wody do jego wnętrza. Włókna masy makulaturowej w wyniku rozczyniania ulegają pęcznieniu wskutek uszkodzeń błony pierwotnej i wtórnej. Podczas rozczyniania do zawiesiny włóknistej przechodzą wypełniacze, barwniki i zanieczyszczenia. Oddzielenie ich od masy włóknistej jest złożonym problemem. Rozwiązanie go stanowi często o dalszej przydatności pozyskiwanych z makulatury włókien [1-4].

2. ZMIANY STRUKTURY WŁÓKIEN W PROCESIE OBRÓBKI MASY CELULOZOWEJ

Rozczynianie masy celulozowej przeprowadzane w rozczyntach wirowych, hydropulperach, ze względu na ograniczenie zużycia energii winno trwać do chwili uzyskania dającej się przepompowywać zawiesiny wodnej. Zawierać może ona 20÷30 % części nierozwłóknionych. Operacja ta umożliwi również wstępne oddzielenie od masy ciężkich zanieczyszczeń. Struktura włókien masy celulozowej podczas rozczyniania nie ulega w zasadzie zmianom. Czynnikiem powodującym rozdział skupisk włókien jest w tej operacji przede wszystkim hydrodynamiczne oddziaływanie wody. W operacji rozczyniania rozpoczyna się pęcznienie włókien, bardzo ważne dla papierotwórczych własności masy celulozowej oraz dla przebiegu dalszej obróbki.

Pęcznienie zawartych w makulaturze włókien masy celulozowej umożliwiają powstałe w wyniku poprzedniej jej obróbki uszkodzenia błony pierwotnej, a przede wszystkim warstwy zewnętrznej błony wtórnej włókien.

Wskaźnikiem świadczącym o wielkości zmian strukturalnych włókien, stosowanym powszechnie do oceny właściwości masy celulozowej, jest smarność masy wyrażana w °SR. Na podstawie wyników badań przeprowadzonych przez Autora pracy podano przykładowo smarność rozczyntonej pierwotnej masy celulozowej oraz wytworzonej z niej i rozczyntonej wstęgi papieru (braku własnego). Rozczyntowana masa celulozowa miała smarność 13÷15° SR, a masa otrzymana z rozczynienia braku własnego – 38° SR.

Smarność masy celulozowej będąca funkcją oporu właściwego filtracji nie jest zależna jedynie od zmian strukturalnych włókien. Wartość jej zwiększa się wraz ze wzrostem udziału w rozczyntanej masie oderwanych fibryl, skróconych włókien oraz cząstek wypełniaczy.

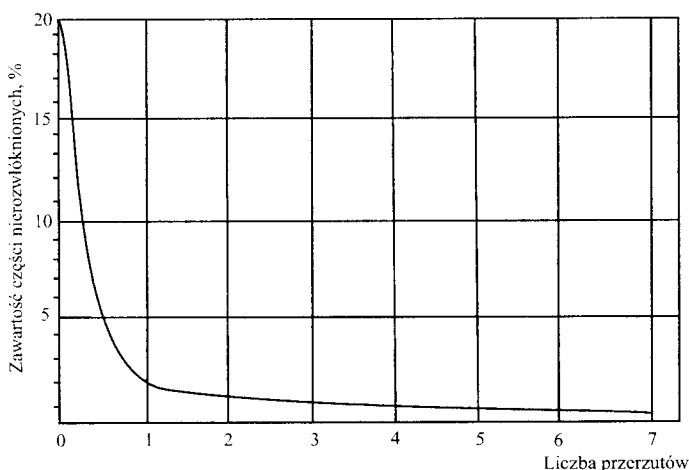
Smarność masy nie jest wskaźnikiem jednoznacznie zależnym od zmian strukturalnych włókien.

Rozwłóknianie makulatury połączone jest z dalszym pęcznieniem włókien masy celulozowej. W zależności od zastosowanego sposobu rozwłókniania włókna masy celulozowej mogą ulegać zmianom strukturalnym w postaci fibrylacji, cięcia i kędzierzawienia. Zmiany takie mogą powstawać zwłaszcza przy rozwłóknianiu makulatury w hydrafinerach. Szerokie ich noże, przy dużych prędkościach obrotowych wirników powodują, obok rozdzielania pęczków i skupisk włókien, fibrylację. Rozwłóknianie w hydrafinerach powoduje zbędne i niepożądane uszkodzenia włókien w masie makulaturowej. Mając na względzie przydatność masy do powtórnego wykorzystania nie należy poddawać jej operacjom, które pogłębiałyby fibrylację i powodowały w efekcie dodatkową niezamierzoną ich degradację. Dla uniknięcia niepożądanego mielenia do rozwłókniania masy makulaturowej należy stosować urządzenia, w których oddziaływanie układów nożowych zostałoby zastąpione hydrodynamicznym działaniem wody.

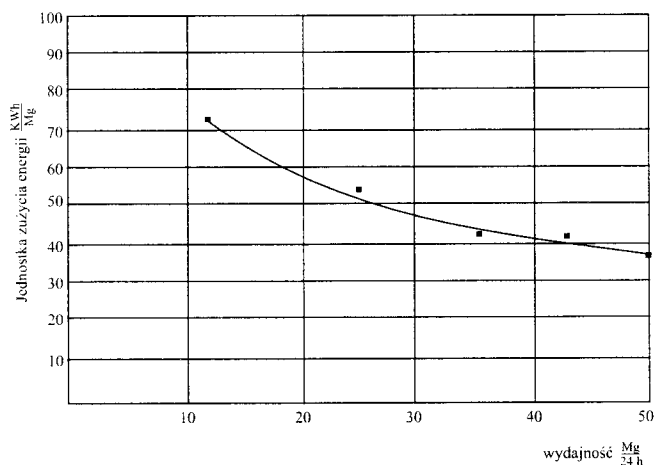
Intensywne działanie hydrodynamiczne na pęczki i skupiska włókien wywierają szybkoobrotowe rozwłókniacze tarczowe generujące szybkozmiennie pulsacje ciśnienia. Szczeliny między tarczami roboczymi tych rozwłóknaczy mają wartość rzędu 1÷1,5 mm, co zapewnia, że prawie całkowicie ograniczone jest w nich mechaniczne oddziaływanie tarcz na włókna. Częstotliwość szybkozmiennych pulsacji ciśnienia odpowiada częstotliwości ultradźwięków. Pulsacje te nie są tłumione w środowisku zawiesiny włóknistej z taką intensywnością jak ultradźwięki.

Szybkozmiennie pulsacje ciśnienia w zawieszynie przepływającej przez roboczą strefę rozwłóknacza szybkoobrotowego powodują niszczenie wiązań wodorowych między włóknami powstających podczas suszenia wstęgi włóknistej w suszarce maszyny papierniczej. Od włókien oddziela się również farba drukarska i barwniki.

Na wykresach przedstawionych na rysunkach 1 i 2 zilustrowano przebieg zmian zawartości części nierozwłóknionych w zależności od liczby przerzutów masy przez rozwłókniacz i jednostkowego zużycia energii od wydajności.



Rys. 1. Przebieg zmiany zawartości części nierozwłóknionych w zależności od liczby przerzutów przez rozwłókniacz HM-75 - makulatura niesortowana biurowa



Rys. 2. Zależność jednostkowego zużycia energii przez rozwłókniacz HM-75 od wydajności w $Mg/24h$ masy makulaturowej

Po osiągnięciu przez masę smarności uzyskanej w procesie mielenia, wzrost jej przy kolejnych przerzutach jest nieznaczny. Szybkoobrotowe rozwłókniacze tarczowe nie powodują przy rozwłóknianiu makulatury degradacji zawartych w niej włókien celulozowych.

Rozpatrując oddziaływanie szybkozmiennych, mechanicznie generowanych pulsacji ciśnienia na włókna masy celulozowej w makulaturze przeprowadzono analizę zależności między parametrami konstrukcyjnymi i technologicznymi szybkoobrotowego rozwłóknacza z perforowanymi tarczami.

Ze względu na dużą energochłonność rozwłókniania w tego typu urządzeniach ustalono - stosując metodę analizy wymiarowej - zależność między mocą potrzebną do napędu wirnika rozwłóknacza szybkoobrotowego a wielkościami wpływającymi w znaczący sposób na przebieg rozwłókniania.

Przyjęto, że zależność ta opisana jest funkcją ogólną o postaci:

$$N = f(\eta_d, q_v, \rho, f, d) \quad (1)$$

gdzie:

N - moc potrzebna do napędu wirnika rozwłóknacza w W ,

η_d - pozorna lepkość dynamiczna zawiesiny włóknistej w $Pa \cdot s$,

q_v - strumień objętości zawiesiny przepływającej przez obszar roboczy rozwłóknacza w m^3/s ,

ρ - gęstość zawiesiny w kg/m^3 ,

f - częstotliwość pulsacji ciśnienia w Hz ,

d - wymiar liniowy charakteryzujący obszar pulsacji ciśnienia, za który przyjęto średnicę wirnika w m .

Pozorna lepkość dynamiczna zawiesiny włóknistej zależy od stężenia masy i jej właściwości, takich jak smarność i stopień spęcznienia włókien wyrażony wskaźnikiem WRV. Od stężenia masy zależy również pozorna jej gęstość. Częstotliwość pulsacji ciśnienia jest zależna od prędkości obrotowej wirnika oraz perforacji tarcz roboczych. Ogólną częstotliwość pulsacji określa się zależnością:

$$f_{om} = \sum_1^m k_{m_i-1} \cdot k_{m_i} \cdot n$$

gdzie:

f_{om} - ogólna częstotliwość pulsacji,

k_{m_i-1} - liczba otworów w rzędzie m_{i-1} na wirniku poprzedzającym rząd m_i na tarczy stałej,

k_{m_i} - liczba otworów w rzędzie m_i na tarczy stałej,

n - liczba obrotów wirnika w czasie $1s$,

m - liczba rzędów otworów.

Częstotliwość ogólna nie ma fizycznej interpretacji, gdyż za źródło pulsacji ciśnienia uznać należy każde wzajemne przesunięcie się względem siebie otworów na wirniku i tarczy stałej. Częstotliwość pulsacji jest czynnikiem decydującym o intensywności rozwłókniania masy makulaturowej.

Przyjmując, zgodnie z zasadami analizy wymiarowej, że funkcja opisująca zależności między wielkościami wpływającymi w istotny sposób na rozwłóknianie masy makulaturowej ma charakter wykładniczy, zapisano ją w postaci:

$$N = C \cdot \eta_d^a \cdot q_v^b \cdot \rho^c \cdot f^h \cdot d^e \quad (2)$$

Po zastąpieniu wielkości występujących w równaniu 2 ich mianami i ustaleniu zależności między wykładnikami potęgowymi oraz uporządkowaniu równania według wykładników potęgowych ustalono postaci liczb kryterialnych:

$$\frac{N}{\rho \cdot f^3 \cdot d^5} = C \cdot \left(\frac{\eta_d}{f \cdot \rho \cdot d^2} \right)^a \cdot \left(\frac{q_v}{f \cdot d^3} \right)^b \quad (3)$$

Z zapisu zależności między bezwymiarowymi liczbami podobieństwa wynika, że na rozwłóknianie masy duży wpływ wywiera częstotliwość pulsacji zależna od liczby obrotów wirnika i perforacji tarcz. Pozorna lepkość dynamiczna η_d zawiesziny zależy od stężenia masy i takich jej właściwości jak smarność i stopień spęcznienia włókien określany za pośrednictwem wskaźnika WRV. Wskaźnik WRV ma wartość zależną zarówno od fibrylacji włókien, jak i od zawartości w masie mikrofibryl i pociętych włókien. Po rozwłóknieniu masa makulaturowa uzyskuje smarność zbliżoną do wartości sprzed formowania wstęgi włóknistej na maszynie papierniczej. Mielenie masy celulozowej jest operacją w zdecydowany sposób wpływającą na postać i właściwości włókien. Efektami mielenia są: skracanie włókien poprzez cięcie, fibrylacja wewnętrzna, fibrylacja zewnętrzna, kędzierzawienie włókien, pęcznienie, powstawanie frakcji drobnej, lokalne uszkodzenia włókien.

Na właściwości masy makulaturowej wpływ wywiera zwłaszcza fibrylacja wewnętrzna i zewnętrzna. Włókna masy celulozowej w wyniku mielenia, któremu uprzednio zostały poddane, uległy fibrylacji wewnętrznej, przez co zostały osłabione wiązania wodorowe między fibrylami warstwy środkowej błony wtórnej. Warstwa ta, stanowiąca element usztywniający włókno, w rezultacie osłabienia i częściowego rozerwania wiązań wodorowych jest bardziej elastyczna. Powoduje to, że włókna masy celulozowej zawartej w makulaturze są bardziej elastyczne niż w masie pierwotnej niemielonej. Fibrylacja zewnętrzna spowodowana mieleniem polega na uszkodzeniu błony pierwotnej we włóknach celulozy. Tworzące ją mikrofibryle po rozluźnieniu wiązań między cząsteczkami celulozy są oddzielane od powierzchni włókien lub przy mniejszym stopniu zmielenia tworzą na powierzchni włókien „puszek”. Uszkodzenie lub zniszczenie błony pierwotnej odsłania zewnętrzną warstwę błony wtórnej. Mikrofibryle oderwane z błony pierwotnej oraz z błony wtórnej tworzą wraz z pociętymi drobnymi cząstkami włókien frakcję drobną w masie makulaturowej. Frakcja ta zmieszana z frakcją drobną pierwotną oraz z cząstkami wypełniaczy powoduje, że opór właściwy filtracji i zależna od niego smarność masy makulaturowej, a także jej wskaźnik WRV są większe, niż wynikałoby to ze stopnia zmielenia włókien masy celulozowej. Włókna masy celulozowej w makulaturze w wyniku mielenia są również skędzierzawione. Mielenie jest operacją powodującą największe zmiany strukturalne włókien w masie makulaturowej.

Dodatkowe zmiany strukturalne włókien masy celulozowej zawartych w makulaturze, polegające głównie na ich skracaniu poprzez cięcie, zachodzą podczas egalizacji masy papierniczej.

Podczas formowania wstęgi włóknistej w części sitowej maszyny papierniczej nie zachodzą zmiany strukturalne włókien. Z wodą podsitową odprowadzona jest jedynie pewna ilość krylu i wypełniaczy. W części prasowej maszyny w wyniku nacisku walców pras maleją odległości między włóknami we wstędze włóknistej.

Znaczący wpływ na strukturę i właściwości włókien masy celulozowej wywiera natomiast suszenie. Włókna masy celulozowej zawarte w makulaturze mają w wyniku suszenia następujące zmiany struktury: zrogowacenie powierzchni, połączenia włókien

wiązaniami wodorowymi, skurcz, zaklejenie powierzchni. Zrogowacenie powoduje zmiany zdolności pęcznienia włókien przy powtórnym ich kontakcie z wodą. Zrogowacenie wzrasta wraz z zawartością hemiceluloz.

Podczas suszenia, zwłaszcza w drugim jego okresie, pod wpływem sił napięcia powierzchniowego następuje zbliżenie się włókien. Przy odległościach mniejszych niż 25 nm powstają między włóknami wiązania wodorowe.

Anizotropowy skurcz wstęgi papieru podczas suszenia jest efektem wzajemnego oddziaływania łączących się włókien masy celulozowej. Skurcz papieru dzieli się na: skurcz na długości wstęgi, skurcz na grubości, skurcz poprzeczny. Skurczowi ulegają również same włókna celulozy. Skurcz ten w kierunku poprzecznym do osi wynosi 20÷30 % a w kierunku wzdłużnym 1÷2 %. Recycling masy makulaturowej związany jest również z zwracaniem do obiegu kleju znajdującego się w makulaturze. Klej ten może być wprowadzony przez zaklejanie papieru „w masie” lub naniesiony na powierzchnię wstęgi przy zaklejaniu powierzchniowym. Przy zaklejaniu wprowadzany jest również środek obniżający pH masy - jest nim siarczan glinu. Klej po osiągnięciu przez wstęgę papieru suchości 65 % zaczyna się topić, a w drugim okresie suszenia ulega spiekaniu. Podczas satynowania papieru w kalandrach włókna masy celulozowej zbliżają się do siebie, co sprzyja powstawaniu między nimi dodatkowych powiązań. W przypadku stosowania zbyt dużych docisków między walcami kalendra następuje przegniatanie wstęgi i występują uszkodzenia zewnętrznych włókien papieru oraz zmiany w stopniu zaklejenia.

Bardzo dużym problemem w procesie recyklingu makulatury jest zanieczyszczenie farbami drukarskimi, tonerami, barwnikami i laminatami. Zanieczyszczenia te stanowią w wielu przypadkach czynnik decydujący o sposobie wykorzystania uzyskanej z makulatury masy włóknistej.

3. PODSUMOWANIE

Zmiany strukturalne włókien masy celulozowej odzyskiwanych w makulaturze obniżają ich właściwości oraz pogarszają jakość wytworzonego z makulatury papieru. Dla poprawy jakości surowca odzyskiwanego z recykulacji makulatury koniecznym jest stosowanie złożonego procesu jej obróbki.

W instalacjach przygotowania masy makulaturowej bardzo ważną rolę spełniają układy sortowania. Oddzielane są w nich nie tylko zanieczyszczenia ale również zniszczone w wyniku kolejnych cykli produkcyjnych części włókien: kryl i wypełniacze. Wynikające stąd straty masy surowca wynoszą 10÷15 % wagowo.

Bardzo ważną zaletą recyklingu jest to, że masa makulaturowa w zasadzie nie potrzebuje wówczas stosowania energochłonnego mielenia.

LITERATURA

- [1] McKinney R., 1998. Sterowanie procesem odbarwiania makulatury. Przegląd Papierniczy 10, 604.
- [2] Putz H.J., 1996. Ile razy można stosować recycling makulatury ? A.P.R. 33, 851-852.

- [3] Tyralski T., Biel-Tyralska A., 1996. Dyspergowanie i separacja w procesie odbarwiania masy makulaturowej. *Przegląd Papierniczy* 11, 588.
- [4] Wandelt P., 1997. Jak z niesortowanej makulatury wytwarzać bibułki higieniczne ? *Przegląd Papierniczy* 1, 14.

ENERGY CONSUMPTION AND TECHNOLOGICAL CHANGES OF WASTEPAPER RECYCLING

Summary

The article analyses changes in the fibre structure of cellulose pulp due to paper technological process.

The effect was studied on the energy consumption while obtaining paper pulp from wastepaper.

Keywords: paper industry, wastepaper recycling

METODA BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH W WARUNKACH ZŁOŻONEGO STANU NAPRĘŻENIA Z WYKORZYSTANIEM PŁASKICH PRÓBEK ROMBOIDALNYCH

Aleksander Światała, Dariusz Skibicki

Katedra Sterowania i Konstrukcji
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pracy przedstawiono metodę wyznaczania własności zmęczeniowych w warunkach złożonego stanu naprężenia/odkształcenia. Zaproponowano próbki romboidalne oraz uchwyty, pozwalające na uzyskanie dwuosiowego stanu obciążenia na jednoosiowej maszynie wytrzymałościowej. Przedstawiono również program badawczy, którego celem będzie weryfikacja proponowanej metody badawczej.

Słowa kluczowe: dwuosiowe zmęczenie, metody badawcze

1. WSTĘP

Badania zmęczeniowe w warunkach złożonego stanu naprężenia (odkształcenia) prowadzi się z wykorzystaniem różnorodnych próbek, na zróżnicowanych stanowiskach badawczych. Złożoność stanów naprężenia (odkształcenia) można uzyskać poprzez sposób przyłożenia obciążenia oraz ukształtowanie próbek.

W pierwszej grupie występuje bardzo duża ilość rozwiązań: poczynając od maszyn wieloosiowych do odpowiednio oprzyrządowanych maszyn jednoosiowych. Próbkami wykorzystywanymi podczas badań są: próbki walcowe, rurkowe cienkościenne, krzyżowe.

Wykorzystując specjalnie ukształtowane próbki zyskujemy możliwość realizacji złożonych stanów odkształcenia (naprężenia) w stosunkowo prosty sposób (na maszynie jednoosiowej). Próbkami, jakie stosuje się w tym celu, są np. próbki płytowe owalne lub romboidalne.

Na podstawie analizy literatury [1-4] zauważyć można, jak wiele metod stosowanych jest w badaniach zmęczenia wieloosiowego. Większość z nich ma jednak jedną zasadniczą wadę: są kosztowne. Przeciwwagą dla tych metod wydaje się być sposób wyznaczania wieloosiowych własności zmęczeniowych przy wykorzystaniu jednoosiowej maszyny wytrzymałościowej z zastosowaniem próbek romboidalnych [5]. Oprócz prostoty rozwiązania, znaczącymi zaletami tej metody są jednorodny rozkład odkształceń na dużej części powierzchni próbki oraz łatwość obserwacji zachodzących zjawisk.

2. PROPONOWANA METODA BADAWCZA

Proponowana metoda, dzięki wykorzystaniu specjalnie ukształtowanych próbek oraz za sprawą cyklicznie zmiennych obciążeń jednoosiowych, umożliwia uzyskanie dwuosiowego stanu odkształcenia (naprężenia) na jednoosiowej maszynie wytrzymałościowej.

Próbka ma kształt romboidalny. Można ją potraktować jako złożenie dwóch belek o jednakowej wytrzymałości na zginanie. Osie takich belek pokrywają się z przekątnymi próbki. Unikalną cechą próbek o takim kształcie jest jednorodny rozkład odkształceń i naprężeń na dużym obszarze powierzchni próbki.

Dla sposobu obciążenia przedstawionego na rysunku 1 (naroża umocowane są przegubowo) moment gnący M_e odniesiony do jednostki długości e jest funkcją obciążenia Q i odległości c od osi BD:

$$M_e = \frac{Q}{4}(b-c)/e \quad (1)$$

gdzie:

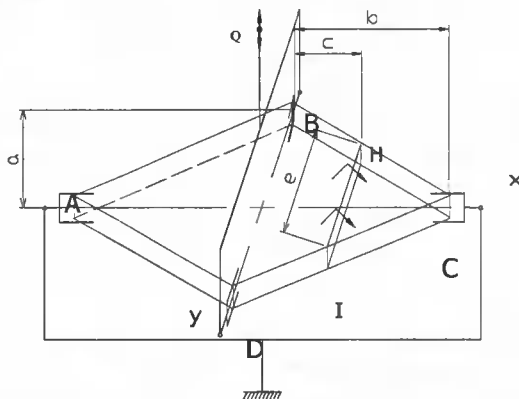
- $Q/4$ - obciążenie działające w pojedynczym narożniku,
- b - połowa długości odcinka AC,
- c - odległość od osi BD,
- e - długość odcinka HI.

Dla próbki o różnych długościach osi długość odcinka HI wynosi:

$$e = 2(b-c)(a/b) \quad (2)$$

gdzie:

- a - połowa długości odcinka BD.



Rys. 1. Wymiary próbki romboidalnej i sposób jej obciążenia

Podstawiając wyrażenie (2) do (1) otrzymujemy wyrażenie na moment jednostkowy dla próbki romboidalnej:

$$M_e = \frac{1}{8}Q(b/a) \quad (3)$$

Jak widać, moment M_e jest niezależny od odległości c od osi BD oraz stały wzdłuż całego odcinka HI, z czego można wnioskować, że na całej powierzchni próbki (poza częściami chwytowymi) panuje jednorodny stan odkształcenia. Jednorodność tego stanu nie jest zależna od stosunku długości przekątnych próbki. Stosunek tych długości wpływa jedynie na wartości naprężeń głównych.

Obciążenie próbki wywoływane będzie przez przemieszczanie uchwytu ruchomego związanego z jedną przekątną próbki. Wywoła ono reakcję w narożach wyznaczających drugą przekątną próbki, związaną z nieruchomym uchwytem maszyny (rys. 1).

Wykorzystana próbka oraz konstrukcja stanowiska umożliwiają stosowanie różnorodnych obciążeń. Próbka może być obciążana zarówno w cyklu wahadłowym, jak i odzerowo tętniącym. Poprzez zmianę stosunku długości przekątnych próbki programować można stosunki uzyskanych naprężeń głównych. W przypadku próbki równoramiennej naprężenia główne będą równe co do wartości:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma = \frac{M_e \cdot e}{W} \quad (4)$$

gdzie:

W - wskaźnik wytrzymałości na zginanie.

Na podstawie rysunku 1:

$$\text{gdzie:} \quad W = \frac{e \cdot g^2}{6} \quad (5)$$

g - grubość płyty.

Po podstawieniu do wzoru na naprężenia otrzymujemy:

$$\sigma = 6M_e / g^2 \quad (6)$$

Dla innego stosunku długości osi naprężenia główne będą od niego zależne. W ogólnym przypadku:

$$\sigma_{1,2} = 6(M_e)_{1,2} / g^2 \quad (7)$$

Podstawiając wartości odpowiednich momentów:

$$\sigma_1 = \frac{1}{8}Q(b/a)/g^2, \quad \sigma_2 = \frac{1}{8}Q(a/b)/g^2 \quad (8)$$

Po prostych operacjach matematycznych uzyskujemy:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (9)$$

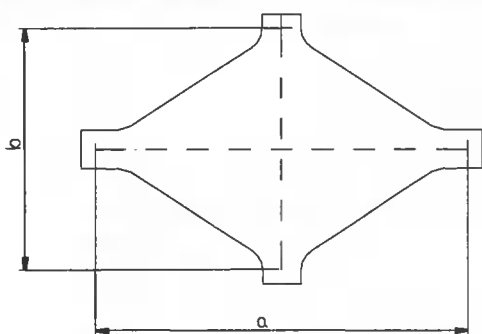
Stosunek σ_1/σ_2 można więc zmieniać dobierając odpowiednie długości osi a i b na podstawie powyższego związku.

3. ZAŁOŻENIA DO PROGRAMU BADAŃ

Przedstawiona propozycja metody badań zmęczeniowych w warunkach złożonego stanu naprężenia (odkształcenia) wymaga weryfikacji eksperymentalnej.

Pierwszym etapem badań zasadniczych będzie próba potwierdzenia założenia o równomierności rozkładów odkształceń na powierzchniach próbek. W tym celu wykorzystane zostaną pomiary techniką tensometryczną oraz obserwacje fraktograficzne.

Programowanie rozkładu naprężeń będzie odbywać się na drodze doboru geometrii próbki. Do badań proponuje się wstępnie stosunki przekątnych jak na rysunku 2. Wytyczne do doboru stanu naprężeń zaczerpnięto za [5].



| a/b | f_{σ} |
|-------|--------------|
| 2 | -0.25 |
| 1,5 | -0.44 |
| 1 | -1 |

Rys. 2. Próbką

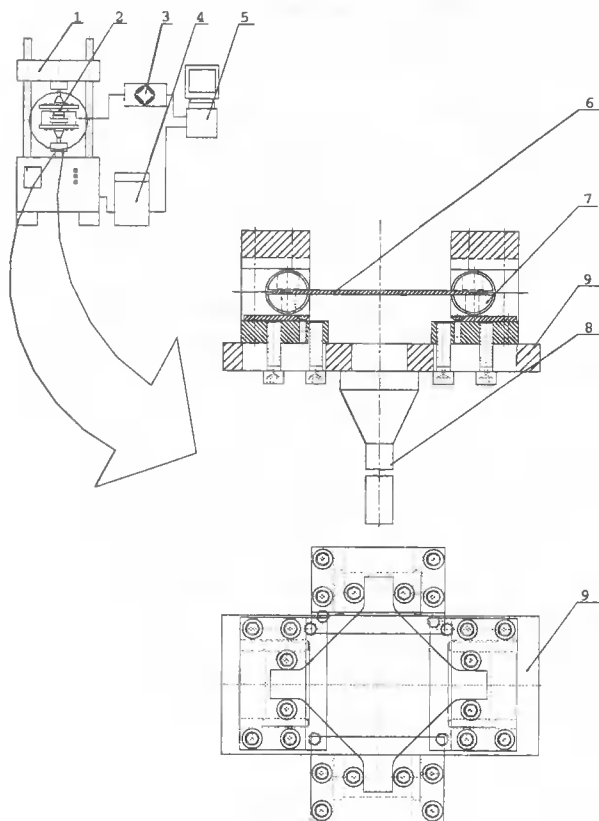
W drugim etapie badań wyznaczone zostaną wybrane charakterystyki zmęczeniowe dla wskazanych powyżej stosunków naprężeń. Podczas realizacji prób zmęczeniowych zostanie przeprowadzona obserwacja wzrostu pęknięcia na powierzchniach próbek (topografia pęknięcia). Zniszczone próbki zostaną z kolei poddane badaniom fraktograficznym przy użyciu mikroskopu skaningowego.

4. STANOWISKO

W celu zrealizowania przedstawionego programu badań skonstruowano przyrząd umożliwiający obciążenie próbki jak na rysunku 1. Będzie on mocowany na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawia rysunek 3. Składa się ono z trzech zasadniczych elementów: maszyny zmęczeniowej, uchwytów oraz toru pomiarowego.

Próbka jest mocowana w dwóch identycznych uchwytach, obroconych względem siebie o 90° . Uchwyty w miejscach zamocowania odbierają próbce jeden stopień swobody, tj. w kierunku osi y. Ich konstrukcja pozwala na zamocowanie próbek o różnych stosunkach długości ramion.

Całość mocowana jest w szczękach maszyny zmęczeniowej. Maszyna sterowana będzie bezpośrednio sterownikiem 4, który jednocześnie zbiera dane o przemieszczeniu tłoka oraz sile. Natomiast dane o odkształceniach na powierzchni próbki mierzone będą za pomocą tensometrów oraz mostka. Dane z obu tych źródeł gromadzone będą w komputerze 5, pełniącym funkcję rejestratora.



Rys. 3. Schemat stanowiska: 1 - maszyna do badań zmęczeniowych, 2 - skonstruowany przyrząd, 3 - mostek do pomiaru odkształceń próbki, 4 - sterownik maszyny, 5 - komputer, 6 - próbka, 7 - łożysko, 8 - trzpień mocujący, 9 - płyta dolna

5. WNIOSKI

Ze względu na interesujące własności uzyskiwanych stanów naprężenia i odkształcenia oraz prostotę realizacji badań metoda wydaje się bardzo atrakcyjna. Istnieje jednak konieczność weryfikacji możliwości stosowania tej metody. W chwili obecnej trwają prace nad przygotowaniem stanowiska badawczego oraz próbek romboidalnych.

LITERATURA

- [1] Batische R., Fant-Jaekels H., Curie F., Virely J.M., 1996. Biaxial high cycle fatigue tests on a gas transmission pipeline steel. *Fatigue and Fract. Enging Mater. Struct.*, Vol. 19, no 10, 1231-1238.

- [2] Beretta S., Clerici P., 1997. A novel test rig for narrow band random fatigue under rotating bending. *International Journal of Fatigue*, Vol. 19, no 6, 457-460.
- [3] Eleiche A.M., Megahedt M.M., Abd-Allach N.M., 1996. Low-cycle fatigue in rotating cantilever under bending II: experimental investigations on smooth specimens. *International Journal of Fatigue*, Vol. 18, no. 8, 577-592.
- [4] Susmel L., Petrone N., 2001. Fatigue life prediction for 6082-T6 cylindrical specimens subjected to in-phase and out-of-phase bending/torsion loading. *Proceedings of the 6th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue & Fracture, Lisboa-Portugal*, Vol. 1, 125-132.
- [5] Zamrik S.Y., Ledger D.J., Date C., 1997. Fatigue Characteristics of Thin Titanium Plates Due to Biaxial Stress Cycling. *Proceedings of the 5th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue & Fracture, Cracow-Poland*, Vol. 2, 167-187.

FATIGUE TESTS METHOD UNDER COMPLEX LOADING WITH PLATE RHOMBOIDAL SPECIMENS

The paper offers a fatigue properties prediction method under complex loading. Rhomboidal specimens and special clamping devices are proposed. The clamping devices enable obtaining biaxial stresses state with the uniaxial testing machine. Additionally there has been proposed a research schedule to verify the method proposed.

Keywords: biaxial fatigue, testing methods

WPŁYW CZĘSTOTLIWOŚCI SYGNAŁU STERUJĄCEGO NA PARAMETRY WYPIŁYU STRUMIENIA POWIETRZA Z DYSZY OSIOWOSYMETRYCZNEJ

Sylwester Wawrzyniak

Katedra Sterowania i Konstrukcji
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań zachowania się strumienia głównego dyszy osiowosymetrycznej monostabilnej pod wpływem strumienia sterującego, podawanego z różną częstotliwością. Celem badań było określenie i wyznaczenie maksymalnej wartości częstotliwości zadawania strumienia sterującego, dla której widoczne są dwa stany stabilne, oraz wartości bezwzględnej intensywności turbulencji. Przedstawiono schemat zmodernizowanego stanowiska badawczego, analizę wyników i wnioski wynikające z przeprowadzonych pomiarów.

Słowa kluczowe: dysza osiowosymetryczna, dysza monostabilna

1. WSTĘP

Badania miały na celu określenie możliwości sterowania strumienia głównego dyszy osiowosymetrycznej z rdzeniem wewnętrznym za pomocą strumienia sterującego w postaci impulsów prostokątnych o różnych częstotliwościach, przy symetrycznym wypełnieniu okresu. Parametry strumienia głównego uzyskane w tych badaniach są związane z zastosowaniem oscylatora strumieniowego. Podczas procesu suszenia na powierzchni suszonego elementu wytwarza się warstwa graniczna, której grubość zależna jest między innymi od czasu przepływu powietrza. Według Stokes'a, grubość niestacjonarnej warstwy granicznej δ wynosi:

$$\delta = 2 \cdot \sqrt{\nu \cdot t}$$

gdzie: ν jest współczynnikiem lepkości kinematycznej, natomiast t jest czasem odniesienia [1]. Wprowadzenie oscylacji i zwiększenie turbulencji powinno zmniejszyć czas ustalonego przepływu, przyczyniając się do zmniejszenia grubości warstwy granicznej utrudniającej proces suszenia. W istniejącej konfiguracji urządzenia bezwzględna intensywność turbulencji osiąga wartości rzędu 0,7-0,8 m/s. Założeniem tych badań jest to, iż wprowadzenie sygnału sterującego o różnej częstotliwości zwiększy wartość turbulencji. Wartość turbulencji oznaczono symbolem V_{RMS} , zgodnie z oznaczeniem występującym w oprogramowaniu Stream Line dostarczonym wraz anemometrem termicznym. Wartość turbulencji jest odchyleniem standardowym od prędkości średniej [3].

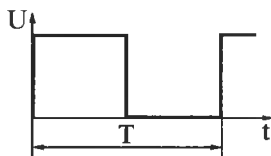
2. STANOWISKO BADAWCZE

W celu wykonania badań zmian parametrów strumienia głównej dyszy osiowo-symetrycznej pod wpływem strumienia sterującego zadawanego z różną częstotliwością należało rozbudować istniejące stanowisko pomiarowe [2]. Rozbudowano je dodając rozdzielacz suwakowy trójdrogowy dwupołożeniowy produkcji ZM RADOM, sterowany elektromagnetycznie elektromagnesem typu UE-10. Jako generator częstotliwości sterującej wykorzystano zestaw laboratoryjny typu PZL-1.

Ustalone zostały następujące parametry pomiarów prędkości strumienia głównego: f - częstotliwość próbkowania, $f = 0,1$ kHz; oraz n - ilość pomiarów jednostkowych, $n = 1024$. Czas trwania pomiaru wynosił $10,24$ s [6].

Badania przeprowadzono dla dwóch przedziałów częstotliwości: pierwszy - w zakresie od $0,2$ Hz do $1,5$ Hz, z krokiem $0,1$ Hz; drugi - w zakresie od 1 Hz do 10 Hz, z krokiem 1 Hz.

Wybrane wyniki badań przedstawiono w dalszej części artykułu w postaci wykresów zmian prędkości strumienia w czasie.

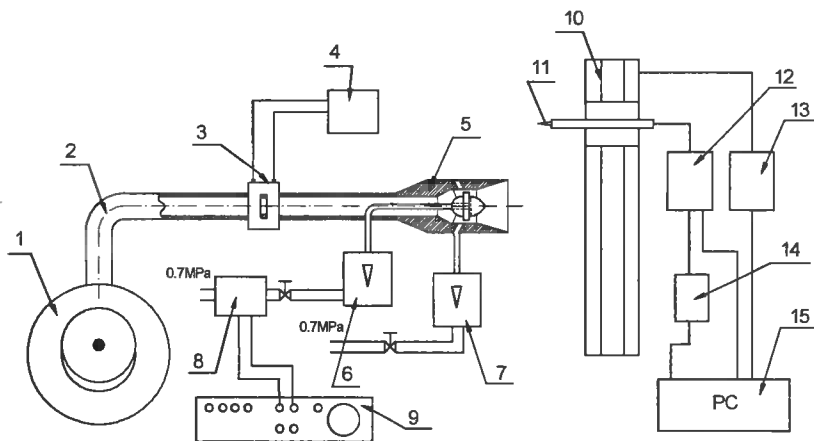


Rys. 1. Schemat sygnału sterującego zaworem elektromagnetycznym

Sygnał sterujący podawany był przez zawór elektromagnetyczny sterowany sygnałem prostokątnym o zmiennej częstotliwości.

Z uwagi jednak na opóźnienia w pracy zaworu oraz przewody doprowadzające sygnał sterujący do dyszy rzeczywisty przebieg sygnału sterującego nie był tak idealny jak przedstawiony powyżej schemat sygnału sterującego zaworem (rys. 1).

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 2.



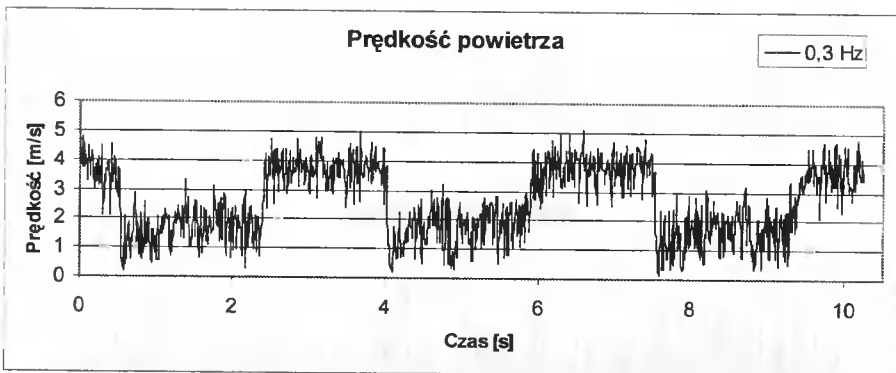
Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego do badania osiowosymetrycznej dyszy strumieniowej: 1 - wentylator zasilający, 2 - rurociąg doprowadzający, 3 - kryza pomiarowa, 4 - elektroniczny mikromanometr różnicowy CMR-10A, 5 - badana dysza, 6, 7 - rotametr, 8 - zawór elektromagnetyczny, 9 - generator częstotliwości, 10 - urządzenie trawersujące, 11 - sonda anemometryczna, 12 - mostek termooanemometryczny, 13 - sterownik urządzenia trawersującego, 14 - przetwornik sygnału, 15 - komputer osobisty

3. SPOSÓB BADAŃ

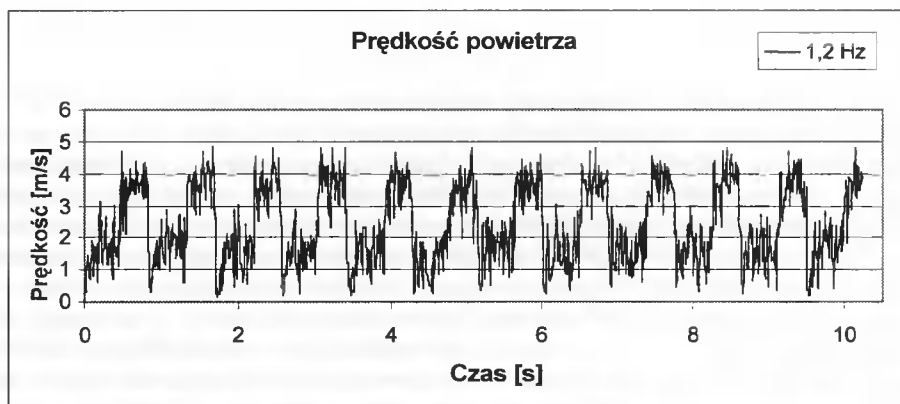
Badania prowadzono przy prędkości wejściowej strumienia 6 m/s, tj. $1,04 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$. Natężenie objętościowe strumienia sterującego wynosiło 4000 l/h, czyli $1,11 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Strumień sterujący dopływał do rdzenia dyszy, a jego natężenie mierzone było rotametrem 6 (rys. 2). Odczyt prędkości powietrza wypływającego z dyszy dokonywany był przy pomocy anemometru termicznego firmy StreamLine [5] w odległości 50 mm od końca dyszy. Sonda umiejscowiona była 10 mm od osi symetrii dyszy, w punkcie gdzie dla pierwszego stanu stabilnego osiągano największe wartości prędkości przepływu powietrza. Strumieniem sterującym był strumień mierzony rotametrem 6 (rys. 2) podawany do wewnętrznego rdzenia dyszy. Jako pierwszy stan ustalony autor określa strumień powietrza wypływającego z dyszy przylegający do jej wewnętrznego stożka w stanie ustalonym bez strumienia sterującego. Przekrój poprzeczny takiego strumienia ma kształt kołowy. Drugi stan ustalony (drugi stan stabilny) występuje przy zadanym i istniejącym sygnale sterującym, gdy strumień główny wypływając z dyszy przylega do zewnętrznego stożka i jego przekrój poprzeczny ma kształt pierścieniowy [4]. Badana dysza uważana jest za monostabilną, ponieważ powstanie i utrzymanie drugiego stanu stabilności wymaga istnienia sygnału sterującego. Zanik sygnału sterującego powoduje powrót strumienia do pierwszego stanu stabilnego; strumień pozostaje w tym stanie do czasu podania sygnału.

4. WYNIKI BADAŃ

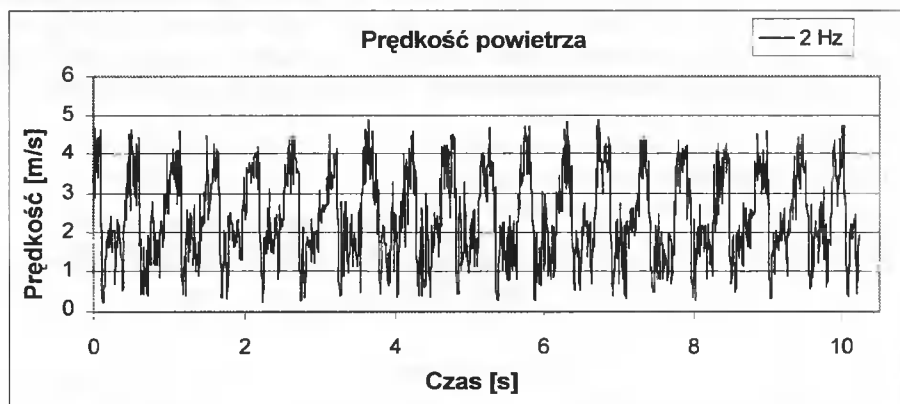
Poniżej przedstawiono wybrane wyniki pomiarów prędkości strumienia głównego przy różnej częstotliwości zadawania sygnału sterującego – rysunki 3-6.



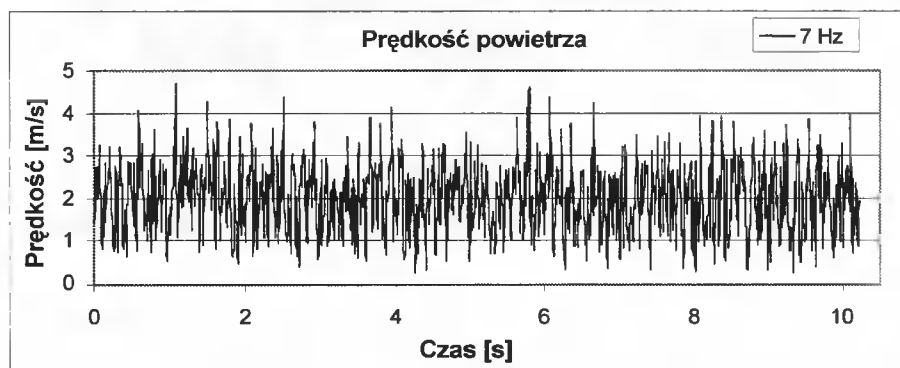
Rys. 3. Wykres zmian prędkości strumienia głównego przy zadanym strumieniu sterującym o częstotliwości 0,3 Hz



Rys. 4. Wykres zmian prędkości strumienia głównego przy zadanej częstotliwości 1,2 Hz



Rys. 5. Wykres zmian prędkości strumienia głównego przy zadanej częstotliwości 2 Hz

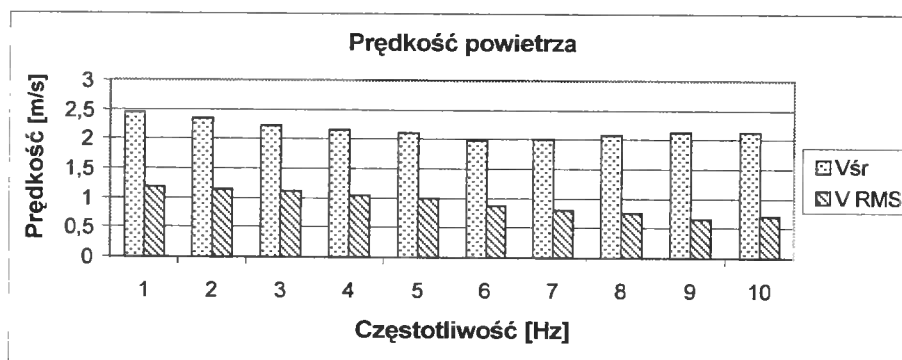


Rys. 6. Wykres zmian prędkości strumienia głównego przy zadanej częstotliwości 7 Hz

5. ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

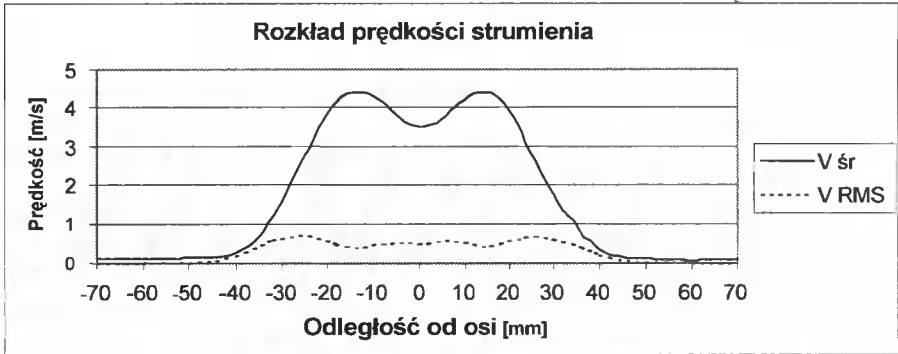
Badania przeprowadzono dla dwóch przedziałów wartości częstotliwości zadawania sygnału sterującego: pierwszy od 0,2 do 1,2 Hz co 0,1 Hz, oraz drugi od 1 do 10 Hz, co 1 Hz. Sygnał sterujący miał wypełnienie 50 % stanu wysokiego i 50 % stanu niskiego, tzn. był sygnałem o modulacji symetrycznej.

Zmiany prędkości strumienia głównego (rys. 7) są wyraźnie zauważalne do wartości 7 Hz. Dla tej częstotliwości uzyskano także najniższą średnią prędkość powietrza, najwyższe wartości średniej prędkości uzyskano dla częstotliwości poniżej 1 Hz. Na rysunku 7 umieszczono także wartości bezwzględnej intensywności turbulencji oznaczonej V_{RMS} . Wielkość turbulencji ma istotny wpływ przy zastosowaniu oscylatora w procesach suszenia. Przy częstotliwościach od 5 do 10 Hz zauważono wyraźny spadek wartości V_{RMS} . Dla częstotliwości z pierwszego zakresu pomiarowego, tzn. od 0,2 Hz do 1,5 Hz uzyskano zbliżone wartości turbulencji w całym zakresie pomiarowym. Uzyskano wprawdzie zwiększenie wartości w stosunku do przepływu w stanie ustalonym, lecz różnice między poszczególnymi wartościami turbulencji były prawie niezauważalne. Na rysunku 8 przedstawiono wykres rozkładu średniej prędkości strumienia oraz wartości bezwzględnej intensywności turbulencji dla pierwszego stanu ustalonego. Dla stanu ustalonego największa wartość bezwzględnej intensywności turbulencji wynosi 0,73 m/s. Badana pulsacja strumienia sterującego zwiększyła wartość turbulencji o około 70 % jej wartości dla stanu ustalonego, co pozwala stwierdzić, że początkowe założenia były słuszne.

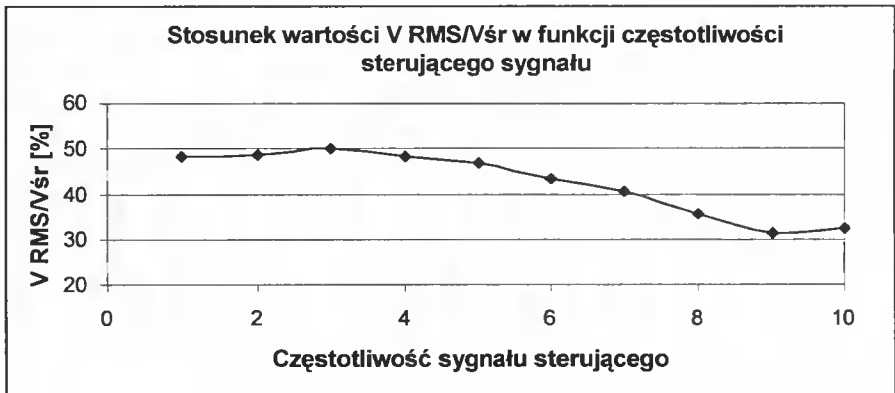


Rys. 7. Wykres zbiorczy zmian prędkości strumienia głównego $V_{\text{śr}}$ i wartości bezwzględnej intensywności turbulencji V_{RMS} dla różnych wartości częstotliwości strumienia sterującego

Ze względów energetycznych korzystne jest stosowanie w urządzeniach suszących takich parametrów pracy oscylatora, dla których wartość $VRMS/V_{\text{śr}} \cdot 100\%$ jest największa. Z wykresu na rysunku 9 wynika, że najkorzystniejszymi częstotliwościami sygnału sterującego są częstotliwości z początku drugiego zakresu pomiarowego, tzn. częstotliwości od 1 do 4 Hz. Największą wartość uzyskano dla częstotliwości 3 Hz i wynosiła ona 50,16 %.



Rys. 8. Wykres rozkładu prędkości strumienia i wartości turbulencji dla ustalonego przepływu w pierwszym stanie stabilnym



Rys. 9. Wykres stosunku wartości intensywności turbulencji do wartości średniej prędkości strumienia powietrza wypływającego z dyszy

Następnym krokiem w pracy będą badania nad zastosowaniem układu membranowego jako generatora strumienia sterującego, mającego wyeliminować dotychczas stosowane zawory suwakowe.

LITERATURA

- [1] Brunn H. H., 1995. Hot-wire anemometry. Principles and signal analysis. Oxford University Press, ISBN 0 19 856342 6.
- [2] Peszyński K., Kuszyński Z., Światała A., 2000. Konstrukcja i badania aktywnie sterowanej dyszy strumieniowej do urządzeń technologicznych. X Międzynarodowa Konf. Nauk.-Tech. X - ICMR '2000, Bydgoszcz, 47-54.
- [3] Wawrzyniak S., 2000. Numeryczne modelowanie elementów strumieniowych. Forum młodych 2000, Bydgoszcz-Borówno 19-20 czerwca, 237-242.
- [4] Wawrzyniak S., Peszyński K., 1999. Analiza wpływu parametrów konstrukcyjnych na własności dyszy osiowo symetrycznej. Seminarium Nauk. Postępy

w sterowaniu i konstrukcji, Bydgoszcz, streszczenie s. 39, pełny tekst na płycie CD-ROM.

- [5] Wawrzyniak S., Peszyński K., 2000. Problematyka pomiaru prędkości miejscowych przy pomocy termooanemometru w urządzeniach technologicznych. X Międzynarodowa Konf. Nauk.-Tech. X - ICMR'2000, Bydgoszcz, 41-46.
- [6] Wawrzyniak S., 2000. Badania anemometryczne pól prędkości na przykładzie dyszy osiowosymetrycznej. Seminarium Nauk. Postępy w sterowaniu i konstrukcji. Bydgoszcz.

EFFECT OF CONTROL SIGNAL FREQUENCY ON PARAMETERS OF AIR STREAM FROM THE AXISIMMETRIC NOZZLE

Summary

The paper presents selected results of the measurement of the air stream from the axisymmetric nozzle as affected by changing control signal frequency. The aim of the study was to define and to set the maximal frequency of control signal for two stable states of air stream and the absolute turbulence value. There are given a diagram of a modernised research stand, results analysis and conclusions.

Keywords: axisymmetric nozzle, monostable nozzle

DRGANIA WALCA PROWADZĄCEGO KRAJARKI PAPIERU KL63

Janusz Zachwieja

Katedra Mechaniki Stosowanej
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Kaliskiego, 85-000 Bydgoszcz

W pracy porównano wyniki pomiarów częstości rezonansowej walca prowadzącego krajarki papieru KL 63 z obliczeniami numerycznymi przy zastosowaniu MES i SES.

Słowa kluczowe: dynamika maszyn, drgania własne, metody elementów skończonych

1. WSTĘP

Drgania elementów maszyn są zjawiskiem bardzo niekorzystnym lecz niestety trudnym do wyeliminowania. Najczęściej przyczyną drgań elementów wirujących jest nierównomierny rozkład mas tzw. niewyważenie, które może mieć charakter statyczny lub dynamiczny. Wymuszenie o charakterze bezwładnościowym jest eliminowane na drodze wyważania. W przypadku elementów maszyn możemy dokonywać wyważania tak na urządzeniach stacjonarnych, jak i w łożyskach własnych. Prawidłowy wybór płaszczyzn korekcji pozwala na uzyskanie poprawnych wyników wyważania wałów giętkich, tj. długich wałów o małych sztywnościach [1, 4].

Wartości dopuszczalnych prędkości drgań dla danej klasy maszyn są określone normami (PN-90/N-01358, ISO3945, ISO10816-1). Odpowiadają one zazwyczaj znikomemu małym tzw. niewyważeniom resztkowym, których wpływ na trwałość elementów maszyn nie jest duży. Jeżeli jednak częstość obrotowa niewyważonego elementu wirującego maszyny jest bliska częstości drgań własnych, pojawia się zjawisko rezonansu. Wówczas najlepszym rozwiązaniem jest modyfikacja konstrukcji maszyny prowadząca do zmiany wartości jej częstotliwości rezonansowych poprzez [6]:

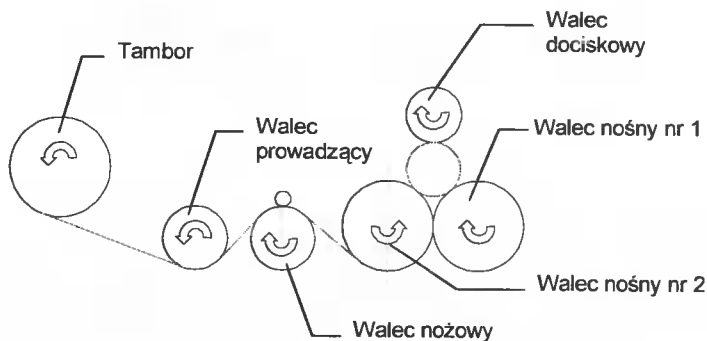
- zastosowanie dodatkowych elementów usztywniających,
- zastosowanie dodatkowych izolatorów drgań,
- zmianę posadowienia na fundamentach,
- zmianę wymiarów elementu wirującego lub odległości między łożyskami.

Wyznaczenie częstości własnych drgań wałów dokonuje się najczęściej w sposób doświadczalny, wzbudzając układ przy pomocy wzbudników zewnętrznych, albo częściej - wykorzystując jego niewyważenie dynamiczne (lub statyczne). Pierwszy sposób jest bez wątpienia bezpieczniejszy, bowiem dochodzenie do częstości rezonansowej może odbywać się w sposób kontrolowany, poprzez regulację częstości siły wymusza-

jącej. Drugi sposób jest możliwy do zastosowania tylko wówczas, gdy możliwa jest płynna regulacja prędkości obrotowej wału. Jeżeli takiej możliwości nie ma, a istnieją obawy, że znamionowa prędkość obrotowa jest bliska pierwszej częstości własnej lub jest od niej wyższa, należy liczyć się z tym, że nawet niewielkie niewyważenie może być przyczyną drgań o dużych amplitudach skutkujących zniszczeniem maszyny. W takich przypadkach konieczne jest wyznaczenie częstości drgań własnych wału na drodze analitycznej.

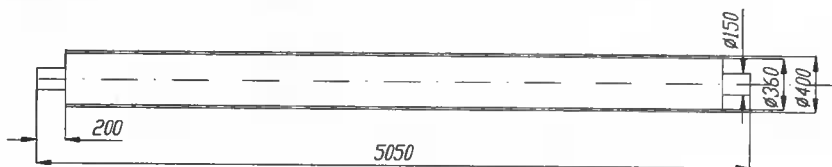
2. ANALIZA DRGAŃ WALCA PROWADZĄCEGO KRAJARKI

Krajarka papieru jest maszyną składającą się z czterech walców połączonych sztywną ramą, walca prowadzącego wstęgę papieru oraz tambora podającego papier. Walec prowadzący oraz tambor, choć stanowią integralne zespoły krajarki, są posadowione osobno (rys. 1).



Rys. 1. Schemat układu walców krajarki KL-63

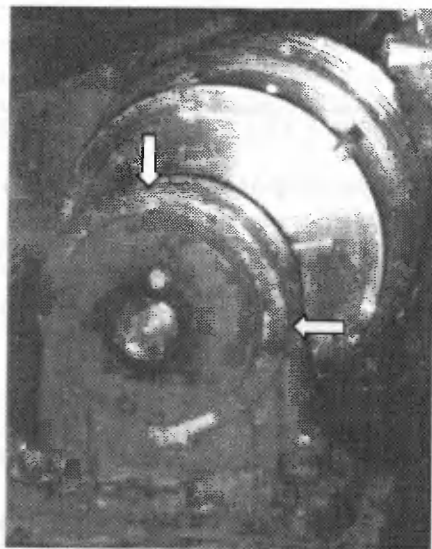
Walec prowadzący ma kształt rury zakończonej czopami, na których osadzone są łożyska toczne. Gabaryty walca pokazane są na rysunku 2. Jego masa całkowita wynosi 900 kg.



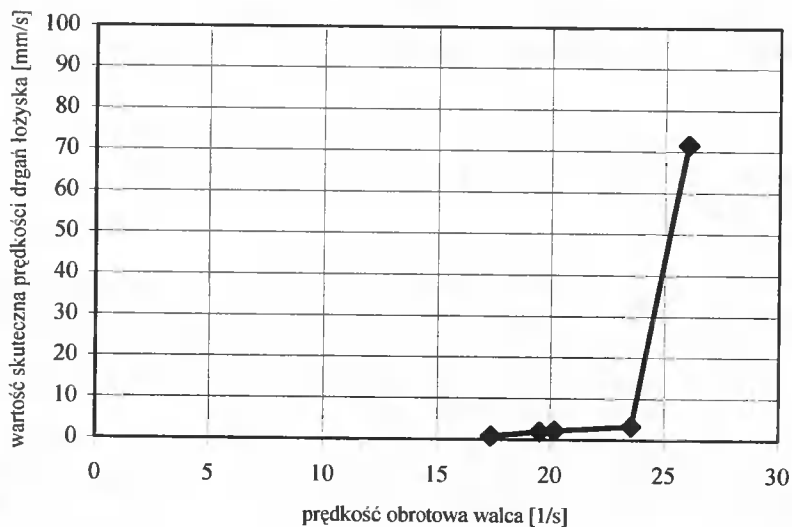
Rys. 2. Walec prowadzący krajarki KL-63

Celem badań było określenie możliwości zwiększenia wydajności pracy maszyny poprzez zwiększenie prędkości przesuwu krojonej wstęgi papieru. Walec prowadzący został przed zamontowaniem wyważony dynamicznie na wyważarce stacjonarnej. Resztkowe niewyważenie o charakterze statycznym miało wartość 0,076 kgm.

Pomiaru parametrów drgań dokonano na obudowie łożysk w miejscach pokazanych na rysunku 3. Wyniki zobrazowano na rysunkach: 4 - pomiar wartości skutecznej (RMS) w funkcji prędkości obrotowej wału; 5 - analiza wąskopasmowa (FFT).

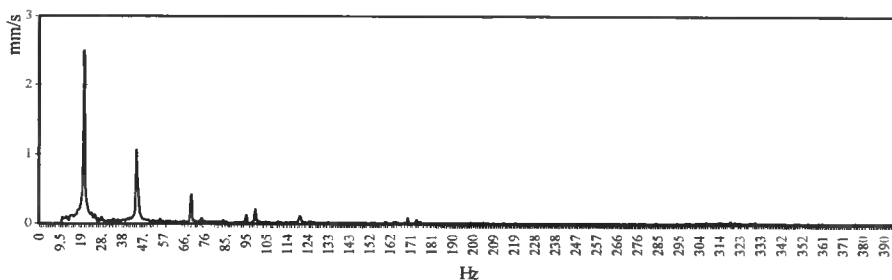


Rys. 3. Miejsca pomiaru drgań łożysk



Rys. 4. Wartość skuteczna (RMS) prędkości drgań łożyska w funkcji prędkości obrotowej walca

Drgania łożysk walca badano w przedziale prędkości obrotowej 17-26 1/s. Prędkość drgań wzrastała od wartości 3,5 mm/s w dolnym zakresie prędkości obrotowej do wartości 70 mm/s w zakresie górnym.



Rys. 5. Prędkość drgań łożyska w funkcji częstotliwości

Zmierzone przemieszczenie węzła łożyskowego przy częstotliwości drgań 20,5 Hz wyniosło 19,4 μm .

Dla określenia wpływu niewyważenia na wielkość drgań łożyska dokonano analizy widmowej drgań w oparciu o szybką transformację Fouriera (FFT) w zakresie częstotliwości 10-390 Hz.

Analiza widmowa rejestruje pojawienie się dominujących amplitud przy częstotliwościach 20,5 Hz, 44 Hz i 70 Hz odpowiadających w przybliżeniu kolejnym składowym harmonicznym. Jest to typowy symptom drgań pochodzących od niewyważenia układu i luzów występujących w węzłach łożyskowych. Luz ten obok własności sprężystych wpływa na sztywność podparcia wału. Znajomość sztywności walca w punktach podparcia jest niezbędna dla prawidłowego modelowania układu przy tworzeniu macierzy sztywności w metodzie elementów skończonych. W celu określenia sztywności translacyjnej łożyska zmierzono jego przemieszczenie. Pomiarów dokonano przy użyciu cyfrowego analizatora drgań SVAN912. Instrument ten spełnia wymogi normy przyrządowej IEC8041 dla urządzeń klasy dokładności „1” oraz norm pomiarowych ISO2631 i ISO5349.

3. ROZWIĄZANIE METODĄ SZTYWNYCH ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

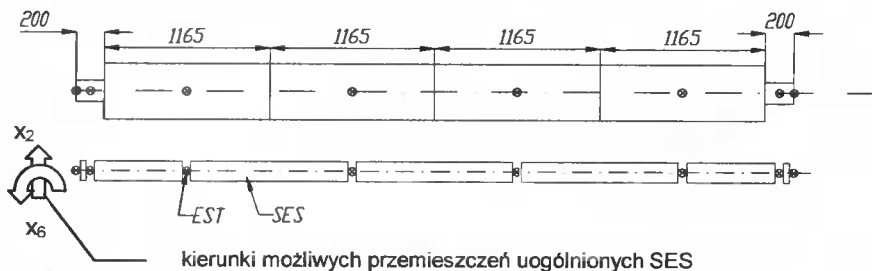
Skutecznym narzędziem do obliczeń częstotliwości drgań własnych układów, zwłaszcza o nieskomplikowanych kształtach, jest pakiet HESAS [3]. Dla celów obliczeniowych wykorzystano własne procedury numeryczne oparte na metodzie SES.

Do obliczeń przyjęto warunki brzegowe dopuszczające niezerowy kąt ugięcia walca na podporach z uwagi na wahlawy sposób jego łożyskowania.

Drgania walca mają charakter drgań skrętno-giętnych. Biorąc pod uwagę fakt, że częstotliwości drgań własnych, giętnych są niższe od częstotliwości drgań skrętnych, można wnioskować, że pierwsza częstotliwość drgań własnych, giętnych będzie częstotliwością rezonansową układu [5].

Obliczenia częstotliwości własnej metodą SES przeprowadzono w oparciu o model pokazany na rysunku 6. Przyjęto, że drgania wału są drganiami o charakterze giętym w kierunku prostopadłym do osi wału. Każdy z SES posiada zatem dwa stopnie swobody opisane przemieszczeniami uogólnionymi w kierunkach x_2 oraz x_6 . We wstępnej fazie obliczeń założono, że podatność łożyska w kierunku x_2 jest równa zero. Przyjęcie

nieskończenie dużej sztywności translacyjnej łożysk prowadzi do wyznaczenia pięciu pierwszych częstości drgań własnych (tabela 1).

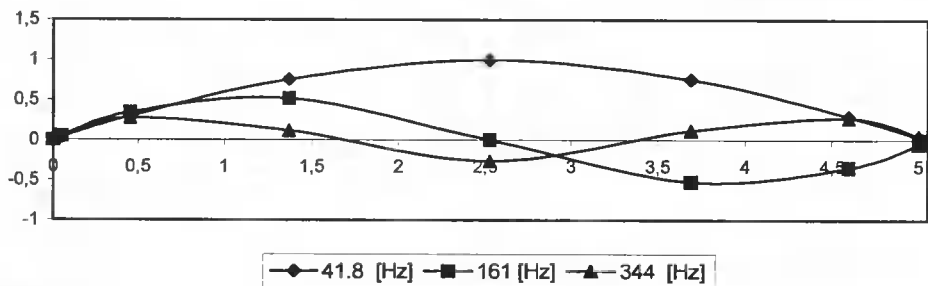


Rys. 6. Podział walca na elementy sprężysto-tłumiące i sztywne elementy skończone

Tabela 1. Pięć pierwszych częstości drgań własnych walca bez uwzględniania podatności łożysk

| Lp. | Prędkość obrotowa walca [1/s] |
|-----|-------------------------------|
| 1. | 41,8 |
| 2. | 161 |
| 3. | 344 |
| 4. | 591 |
| 5. | 881 |

Częstościom własnym odpowiadają postacie drgań własnych. Trzy pierwsze postacie drgań własnych zobrazowano na rysunku 7.



Rys. 7. Trzy pierwsze postacie drgań własnych walca dla podatności translacyjnej łożysk równej zero

Dla warunków sztywnego zamocowania walca obliczona pierwsza częstość własna odpowiadająca częstości rezonansowej jest większa od wartości zmierzonej.

W kolejnej fazie obliczeń oszacowano sztywność translacyjną łożyska w oparciu o wyznaczoną reakcję dynamiczną i przemieszczenie łożyska. Dla reakcji dynamicznej równej 630N i przemieszczenia 19,4 μm , sztywność łożyska w kierunku x_2 można określić z zależności:

$$k = \frac{R_d}{x} = \frac{\frac{1}{2} N \cdot \dot{u}^2}{x} = \frac{0,5N \left(\frac{\delta n}{30} \right)^2}{x} = \frac{0,5 \cdot 0,0766 \cdot 3,14^2 \cdot 1230^2}{19,4 \cdot 10^{-6} \cdot 900} = 32,5 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m} \right] \quad (3.1)$$

gdzie:

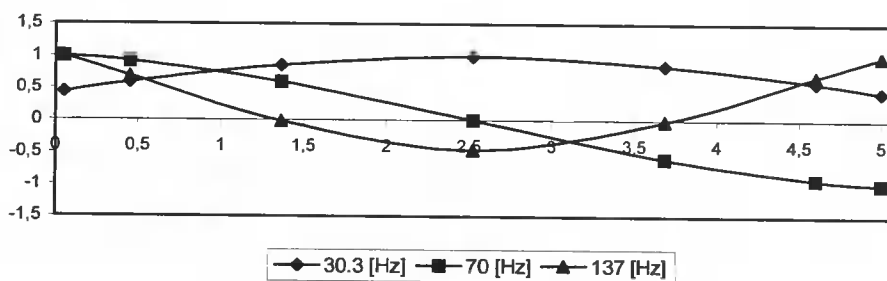
- R_d - reakcja dynamiczna łożyska,
- x - maksymalne przemieszczenie obudowy łożyska,
- N - niewyważenie dynamiczne,
- ω - prędkość kątowna wału.

W metodzie SES zwiększono sztywność EST w miejscu podparcia wału o wartość k wynikającą z zależności (3.1) Wyniki obliczeń częstości własnych drgań i odpowiadające im prędkości obrotowe wału zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Pięć pierwszych częstości drgań własnych walca przy uwzględnieniu podatności łożysk

| Lp. | Prędkość obrotowa walca [1/s] |
|-----|-------------------------------|
| 1. | 30,3 |
| 2. | 70 |
| 3. | 137 |
| 4. | 290 |
| 5. | 514 |

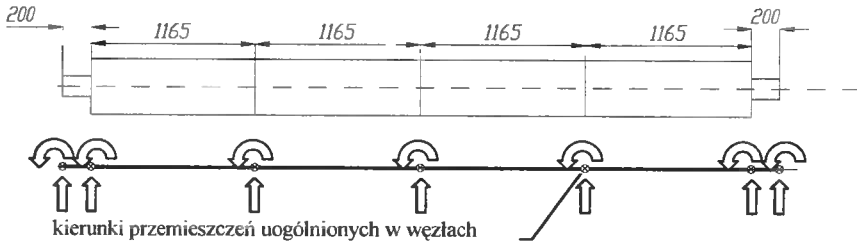
Kształt pierwszej i drugiej postaci drgań własnych odpowiada kolejnopolaci translacyjnej i rotacyjnej po uwzględnieniu efektu wygięcia osi wału pod wpływem obciążeń dynamicznych (rys. 8).



Rys. 8. Trzy pierwsze postaci drgań własnych walca dla podatności łożysk wyznaczonej doświadczalnie

4. ROZWIĄZANIE METODĄ ODKSZTAŁCALNYCH ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Obliczenia częstości własnych i postaci własnych drgań zostały przeprowadzone numerycznie przy pomocy programu opracowanego przez autora. Sposób podziału walca na ES został przedstawiony na rysunku 9.



Rys. 9. Podział walca na elementy skończone

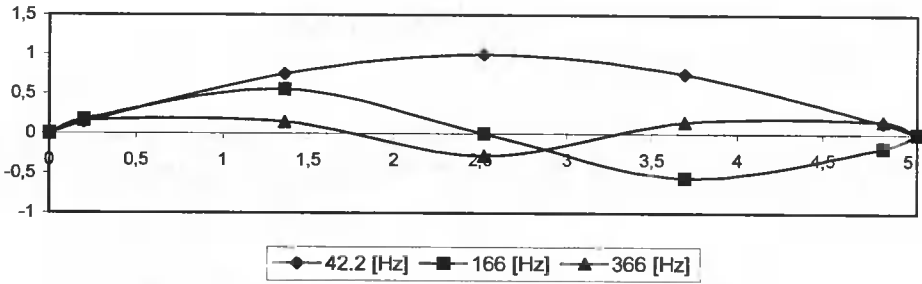
Warunki brzegowe oraz założenia odnośnie sztywności węzłów łożyskowych przyjęto analogiczne jak dla metody SES. Otrzymano następujące wyniki obliczeń - tabela 3.

Tabela 3. Pięć pierwszych częstości drgań własnych walca bez uwzględnienia podatności łożyska oraz dla podatności wyznaczonej doświadczalnie

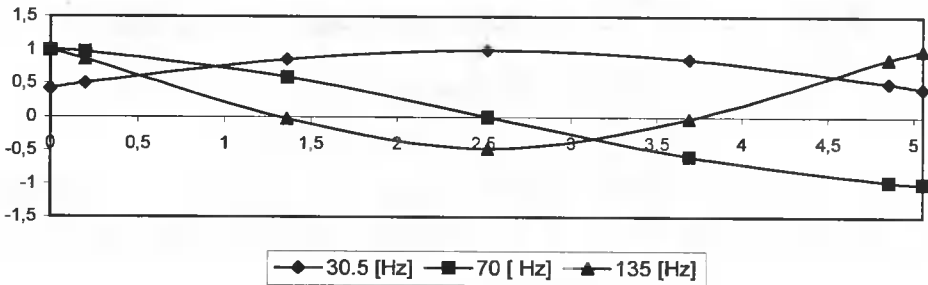
| Lp. | Prędkość obrotowa walca [1/s] | | Prędkość obrotowa walca [1/s] | |
|-----|---------------------------------|------|---|------|
| 1. | podatność łożyska równa zero | 42,2 | podatność łożyska wyznaczona doświadczalnie | 30,5 |
| 2. | | 166 | | 70 |
| 3. | | 366 | | 135 |
| 4. | | 644 | | 290 |
| 5. | | 938 | | 548 |

Postacie drgań własnych odpowiadające częstościom własnym przedstawiono na rysunkach 10 i 11.

Uwzględnienie podatności zamocowania walca prowadzi do modyfikacji w macierzy sztywności elementów odpowiadających węzłom łożyskowym. Ich wartości zwiększono o wyliczony współczynnik k (3.1), co daje wynik w postaci obniżenia częstości krytycznej [2].



Rys. 10. Postacie drgań własnych walca dla przypadku sztywnego zamocowania



Rys. 11. Postacie drgań własnych walca dla zamocowania podatnego

5. DYSKUSJA WYNIKÓW I WNIOSKI

Przeprowadzone wyniki badań drgań wału prowadzącego krajarki oraz obliczenia numeryczne częstości jego drgań własnych skłaniają do następujących wniosków: Osiągnięty stan wyważenia wału okazał się wystarczający dla prędkości obrotowej niższej niż 1410 [obr/min] (2,5 [Hz]). Zwiększanie prędkości przesuwu wstęgi papieru powyżej 30 m/s powoduje wzrost poziomu drgań wału do wartości niebezpiecznych.

Częstości własne drgań wyznaczone na drodze obliczeń różnią się nieznacznie od wartości rzeczywistych. Źródłem błędów są w głównej mierze trudności w poprawnym wyznaczeniu wartości sztywności elementów podparcia wału oraz tłumienia wewnętrznego.

Metody SES dają wyniki zbieżne z wartościami otrzymanymi w metodzie ES. Niewielkie różnice uzyskanych wyników nie pozwalają w tym przypadku oceniać użytych metod pod kątem ich dokładności.

LITERATURA

- [1] Gryboś R., 1998. Drgania maszyn. Wyd. Pol. Śl., Gliwice.
- [2] Gryboś R., 1994. Dynamika maszyn wirnikowych. IPPT PAN Warszawa.
- [3] Kruszewski J., Sawiak S., Wittbrot E., 1999. Metoda sztywnych elementów skończonych w dynamice konstrukcji. WNT Warszawa.

- [4] Łączkowski R., 1979. Wyrównoważanie elementów wirujących. WNT Warszawa.
- [5] Muszyńska M., 1992. Dynamika maszyn wirnikowych. Wyd. Uczeln. WSI, Koszalin.
- [6] Schenck C. Diagnostyka maszyn. Seminarium C40.

VIBRATIONS OF KL63 SHEET CUTTER GUIDE CYLINDER

Summary

The study compares measurement results for KL63 sheet cutter guide cylinder resonance frequency of sheet cutter and numerical calculations with finite elements method.

Keywords: machine dynamics, free vibration, finite elements method

MODELOWANIE W IDENTYFIKACJI STANU DYNAMICZNEGO SILNIKA TURBINOWEGO

Bogdan Żółtowski

Katedra Maszyn Roboczych i Pojazdów
Wydział Mechaniczny ATR
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pracy przedstawiono zasady modelowania w identyfikacji stanu dynamicznego maszyn. Wskazano na możliwe sposoby modelowania stanu dla potrzeb diagnostyki technicznej. Jako przykład omówiono badania wstępne silników turbinowych, które pozwalają na ocenę i prognozowanie ich stanu technicznego oraz ustalenie polityki eksploatacyjnej silników, co jest bardzo istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa i rachunku ekonomicznego.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, identyfikacja, silniki lotnicze

1. WSTĘP

Ważną grupę eksploatowanych w lotnictwie obiektów technicznych stanowią turbiny silniki lotnicze. Własności i warunki eksploatacyjne silnika turbinowego wymuszają opracowanie szeregu metod diagnozowania w celu osiągnięcia pełnej niezawodności działania. Praktyka eksploatacyjna śmigłowców wykazuje, że prawidłowe określenie strategii działania dla personelu eksploatującego zapewnia utrzymanie żądanej sprawności, z uwzględnieniem minimalizacji kosztów eksploatacji.

Utrzymanie niezawodności śmigłowców jest jednym z ważniejszych problemów, gdyż powstanie uszkodzeń powoduje:

- zwiększenie ryzyka wypadku lotniczego,
- straty ekonomiczne,
- uniemożliwienie realizacji określonych zadań.

Jeden ze sposobów rozwiązywania problemu dotyczącego bezpieczeństwa lotów sprowadza się do ciągłego nadzorowania i oceny stanu technicznego poszczególnych elementów i zespołów silników turbinowych, przy zachowaniu wymaganego poziomu niezawodności.

Dane z ostatnich 30 lat dotyczące wypadków lotniczych - według ICAO - wskazują na znaczący procentowy udział uszkodzeń technicznych (10-20 %) jako przyczyny katastrof lotniczych oraz wysoki wskaźnik wynikający z błędów człowieka (10-15 %) [4].

2. IDENTYFIKACJA PROSTA I ZŁOŻONA W DIAGNOSTYCE TECHNICZNEJ

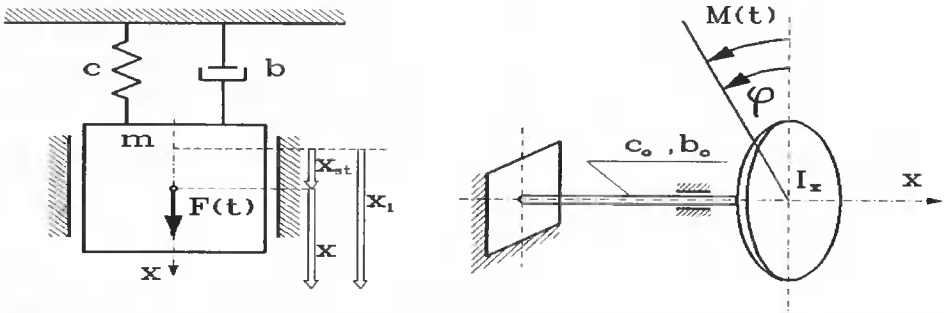
Zmiany stanu maszyn opisywane sygnałem drganiowym odzwierciedlają się w zmieniających wartościach poziomu (parametrów) drgań lub w zmianie transmitancji od punktu uszkodzenia do punktu odbioru. Każdy układ mechaniczny w zakresie niskich częstotliwości można modelować układami dyskretnymi (m , k , c), w najprostszym przypadku o jednym stopniu swobody (rys. 1). W praktyce układ taki może być modelem [5]:

- wirnika maszyny w łożysku ślizgowym z warstwą oleju (c), zamocowanym na korpusie o dużej masie (m) i sztywności (k);
- maszyny o masie (m) przytwierdzonej sztywno do fundamentu o własnościach sprężystych (k , c);
- maszyny (m) na amortyzatorach (k , c) zamocowanej do fundamentu o dużej masie;
- wirnika maszyny (m) w łożysku tocznym (k , c) zamocowanym w korpusie o dużej masie i sztywności;
- wysokiej konstrukcji (platforma wiertnicza, komin, wieża) poddanej działaniu fal morskich lub wiatru.

W większości zastosowań korzysta się z **identyfikacji prostej**, gdzie wyznacza się zmiany wartości m , k , c , albo zmiany parametrów charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych (widma). Do zadań identyfikacji prostej w diagnostyce technicznej należy:

- wyznaczanie struktury modelu, czyli wartości i wzajemnych połączeń między elementami masowymi (m), sprężystymi (k) i dyssypacyjnymi (c);
- wyznaczanie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych układów lub tylko pewnego zbioru ich parametrów.

UKŁAD O 1 SSW



Rys. 1. Układ o jednym stopniu swobody jako najprostszy model obiektu mechanicznego

$$m \ddot{x} + b \dot{x} + cx = F(t) \quad (1)$$

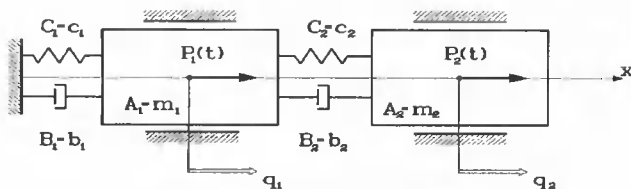
$$x = A \sin(\omega \cdot t + \phi)$$

$$v = \frac{dx}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \phi) \quad a = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dV}{dt} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi)$$

Przedstawione zależności obrazują równanie ruchu drgającego i wynikające z niego parametry procesu drganiowego, co pozwala na zaniechanie trudnego opisu analitycznego (szczególnie dla wielu stopni swobody) i zastąpienie go bezpośrednimi pomiarami drgań. Stan obiektu można więc opisywać zamiennie, zamiast modelowania w kategoriach (m, k, c) stosować opis drganiowy w kategoriach (a, v, x).

Opis obiektu o dwóch stopniach swobody (rys. 2) jest nieco trudniejszy, chociaż efekt końcowy jest podobny.

UKŁAD O 2 SSW



Rys. 2. Model układu o dwóch stopniach swobody

Po uwolnieniu z więzów każdego elementu otrzymuje się następujące układy sił działających na te elementy:

$$\begin{aligned} \text{I: } & P_1(t), b_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1), c_2(q_2 - q_1), -b_1\dot{q}_1, -c_1q_1 \\ \text{II: } & P_2(t), b_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1), c_2(q_2 - q_1) \end{aligned} \quad (2)$$

Stosując zasadę d'Alemberta dla każdego z tych elementów, możemy zapisać dwa równania:

$$\begin{aligned} m_1\ddot{q}_1 &= -b_1\dot{q}_1 - c_1q_1 + b_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) + c_2(q_2 - q_1) + P_1(t) \\ m_2\ddot{q}_2 &= -b_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) - c_2(q_2 - q_1) + P_2(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Wprowadzając pewne uporządkowanie powyższych równań, otrzymamy układ różniczkowy równań ruchu:

$$\begin{aligned} m_1\ddot{q}_1 + (b_1 + b_2)\dot{q}_1 - b_2\dot{q}_2 + (c_1 + c_2)q_1 - c_2q_2 &= P_1(t) \\ m_2\ddot{q}_2 + b_2\dot{q}_2 - b_2\dot{q}_1 + c_2q_2 - c_2q_1 &= P_2(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Stosując prawa rachunku macierzowego, równanie ruchu (2) można zapisać:

$$\begin{vmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} (b_1 + b_2) & -b_2 \\ -b_2 & b_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} q_1 \\ q_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{vmatrix} \quad (5)$$

lub ogólnie:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = Q \quad (6)$$

Dalsze przekształcanie otrzymanego równania wskazuje, że zamiast modelowania można stosować (podobnie jak dla układu o 1SSW) opis drganiowy.

Dla układów złożonych, często nieliniowych, dla potrzeb **identyfikacji złożonej** wykorzystuje się analizę modalną (teoretyczną, eksperymentalną lub eksploatacyjną).

W wyniku jej przeprowadzenia otrzymuje się model modalny, który stanowi uporządkowany zbiór częstości własnych, odpowiadających im współczynników tłumienia oraz postaci drgań własnych. Na podstawie znajomości modelu modalnego można przewidzieć reakcje obiektu na dowolne zaburzenie zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości [8].

Teoretycznie, analiza modalna wymaga rozwiązania zagadnienia własnego dla przyjętego modelu strukturalnego badanej konstrukcji.

Przeprowadzenie eksperymentalnej analizy modalnej wymaga pomiaru drgań konstrukcji w wielu jej punktach przy wymuszeniu działającym w jednym lub wielu punktach wyznaczonej sieci punktów pomiarowych. Jednocześnie musi być mierzony przebieg siły wymuszającej drgania. Estymacja parametrów modelu modalnego polega na aproksymacji zmierzonych charakterystyk konstrukcji za pomocą funkcji, dla której zmiennymi są parametry modelu modalnego.

Eksplatacyjna (operacyjna) analiza modalna wykorzystuje rzeczywiste warunki pracy maszyny jako sygnały wymuszeń, a dalsze przetwarzanie jest podobne jak w eksperymentalnej analizie modalnej.

Mamy więc do dyspozycji różne narzędzia dla potrzeb identyfikacji prostej i złożonej, co skrótkowo pokazano poniżej.

IDENTYFIKACJA STANU DYNAMICZNEGO

PROSTA

- test impulsowy
- test harmoniczny
- test przypadkowy

[m, k, c] ===== [ω, c, p_d]

widmo drgań ===== diagram stabilizacyjny

ZŁOŻONA

- teoretyczna AM
- eksperymentalna AM
- eksploatacyjna AM

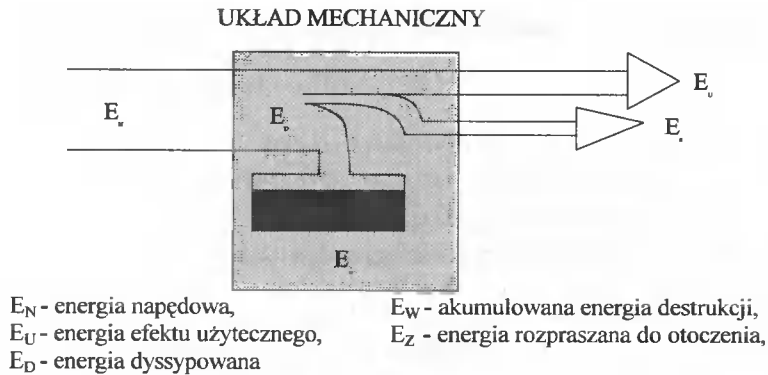
Drgania odzwierciedlają analityczne modele dynamiczne.

3. MODELOWANIE ENERGETYCZNE ZMIAN STANU SILNIKÓW

Jedną z odmian modelowania stanu dynamicznego maszyn jest modelowanie energetyczne, które zaprezentowano na przykładzie silnika turbinowego śmigłowca. Turbinowy silnik lotniczy stanowi układ mechaniczny transformujący energię z nieodłączną jej dyssypacją wewnętrzną i zewnętrzną [5], co przedstawiono na rysunku 3.

Wejściowy strumień energii jest przetwarzany na dwa strumienie wyjściowe, energię użyteczną oraz energię częściowo przekazywaną do środowiska, a częściowo akumulowaną w silniku jako efekt procesów zużyciowych zachodzących podczas jego pracy.

Diagnozowanie poprzez obserwację procesów roboczych oraz monitorowanie ich parametrów w sposób ciągły prowadzi do określenia sprawności energetycznej „η_e” turbinowego silnika lotniczego. Ujmuje ona wszystkie straty energetyczne, jakie zachodzą w procesie wytwarzania energii potrzebnej do wykonania pracy mechanicznej. Wartość sprawności energetycznej „η_e” charakteryzuje również silnik turbinowy pod względem ekonomicznym, gdyż im mniejsze straty energii cieplnej tym sprawność silnika większa.



Rys. 3. Model rozplywu energii

Znajomość energetycznego modelu odwzorowanego zaproponowanymi w [1-3, 7] dwiema miarami (7) oraz (15) umożliwia opis zachowania się silnika turbinowego w czasie eksploatacji.

Sprawność energetyczna silnika turbinowego „ η_τ ” - jest zdefiniowana jako stosunek energii efektu użytecznego „ E_U ” uzyskanego w dowolnym czasie eksploatacji „ τ ” (jednak nie przekraczającego optymalnego okresu racjonalnej eksploatacji do naprawy „ τ_n ”) do energii napędowej „ E_N ” dostarczonej w tym samym czasie dla uzyskania efektu użytecznego:

$$\eta_\tau(\tau) = \frac{E_U(\tau)}{E_N(\tau)} \cdot 100 \% \quad (7)$$

gdzie:

E_U - energia efektu użytecznego [kWh],

E_N - energia napędowa [kWh].

Wielkość energii efektu użytecznego „ E_U ” między naprawami przedstawia zależność:

$$E_U(\tau) = \int_{\tau=0}^{\tau=n} N_U(\tau) d\tau \quad (8)$$

Moc użyteczną „ N_U ” silnika turbinowego w zależności od parametrów gazodynamicznych w zmiennych warunkach eksploatacji można wyznaczyć z relacji [1, 3]:

$$N_U(\tau) = n_i \cdot c_p \cdot t_3^* \left\{ 1 - \frac{1}{\frac{k'-1}{k'}} \right\} \cdot \eta_s \quad (9)$$

Natomiast strumień energii napędowej „ E_N ” wyraża się wzorem:

$$E_N(\tau) = \int_{\tau=0}^{\tau=n} N_N(\tau) d\tau \quad (10)$$

Moc napędową „ N_N ” silnika turbinowego można wyznaczyć z relacji:

$$N_N(\tau) = G_e \cdot W_{op} \quad (11)$$

gdzie: $G_e = g_e \cdot N_U \quad (12)$

G_e - godzinowe zużycie paliwa [kg/h],
 g_e - jednostkowe zużycie paliwa [kg/kWh],
 W_{op} - wartość opałowa paliwa [kWh/kg].

Głównym zadaniem turbinowego silnika lotniczego jest wytworzenie odpowiedniej energii efektu użytecznego „ E_U ”, mającego pokonać siły grawitacyjne oraz opory aerodynamiczne, tzn. zapewnić odpowiednią prędkość lotu śmigłowca. Energia efektu użytecznego „ E_U ” w czasie eksploatacji „ τ ” nie może osiągnąć mniejszej wartości od wartości granicznej „ E_{Ugr} ”, która jest niezbędna do zapewnienia śmigłowcowi odpowiedniej prędkości lotu na danej wysokości. Dla bezpieczeństwa lotów musi być więc zachowany warunek:

$$E_U \geq E_{Ugr} \quad (13)$$

Graniczną wartość energii efektu użytecznego „ E_{Ugr} ” silnika turbinowego określa się jako:

$$E_{Ugr} = Q_{min} \cdot e_U \quad (14)$$

gdzie:

Q_{min} - minimalna masa startowa śmigłowca [kg],
 e_U - jednostkowa energia efektu użytecznego śmigłowca [kWh/kg].

Optymalny okres racjonalnej eksploatacji silnika turbinowego do naprawy

„ τ_n ” - definiuje się jako okres pracy od chwili jej rozpoczęcia do chwili naprawy silnika, gwarantujący najniższy koszt wytwarzania energii efektu użytecznego „ E_U ” w tym okresie czasu. W celu jego określenia należy analizować zmiany zachodzące w kosztach wytwarzania energii efektu użytecznego „ k_U ” według relacji:

$$k_U(n) = \frac{K_c(n)}{E_U(\tau)} \rightarrow \min$$

Całkowity koszt eksploatacji silnika turbinowego „ K_c ” dla rachunku optymalizacyjnego można przedstawić jako [2, 3]:

$$K_c(n) = \int_{\tau=0}^{\tau=n} K(\tau) d\tau + K_k \quad (16)$$

gdzie:

$$K = k_j \cdot E_N \quad (17)$$

$$k_j = g_e \cdot c_e \quad (18)$$

K_c - całkowity koszt eksploatacji silnika turbinowego [zł],
 K - koszt godzinowego zużycia energii napędowej [zł/h],

k_j - jednostkowy koszt energii napędowej [zł/kWh],
 K_k - koszt naprawy silnika [zł],
 c_c - jednostkowy koszt paliwa [zł/kg].

Koszt wytwarzania energii efektu użytecznego „ k_U ” w czasie eksploatacji nie może przekroczyć maksymalnej wartości, czyli musi być spełniony warunek:

$$k_U \leq k_{U_{\max}} \quad (19)$$

Maksymalną wartość kosztu wytwarzania efektu użytecznego „ $k_{U_{\max}}$ ”, jaką może osiągnąć silnik turbinowy w czasie eksploatacji, wyznaczyć należy według wzoru [3]:

$$k_{U_{\max}} = \frac{K_c}{E_{U_{\text{gr}}}} \quad (20)$$

gdzie:

$E_{U_{\text{gr}}}$ - graniczna wartość energii efektu użytecznego [kWh].

Wartość „ $k_{U_{\max}}$ ” jest granicą ekonomicznego okresu racjonalnej eksploatacji. Jeżeli koszt wytwarzania energii efektu użytecznego „ k_U ” przekroczy maksymalną wartość „ $k_{U_{\max}}$ ”, wówczas silnik turbinowy jest wycofany z eksploatacji i poddany naprawie.

4. BUDOWA MODELU ENERGETYCZNEGO SILNIKA

W celu wyznaczenia zmian charakterystyk energetycznych w czasie eksploatacji dla silnika turbinowego rozważa się zależność pomiędzy energią napędową „ E_N ”, energią efektu użytecznego „ E_U ” oraz czasem eksploatacji „ τ ”. Analizę energetyczną silnika turbinowego ujęto w formie bilansu energii o następującej postaci [1-3]:

$$E_N(\tau) = E_U(\tau) + E_W(\tau) + E_Z(\tau) \quad (21)$$

gdzie:

$E_W(\tau)$ - strumień energii dyssypowanej wewnątrz,
 $E_Z(\tau)$ - strumień energii dyssypowanej zewnątrz,
 $E_U(\tau)$ - strumień energii użytecznej.

Strumień zewnętrznych strat energii „ E_Z ”, zmienny w czasie eksploatacji „ τ ”, zależy między innymi od:

- aktualnego stanu technicznego silnika turbinowego,
- destrukcyjnego wpływu dodatniego sprzężenia zwrotnego procesów resztkowych.

Zużycie silnika turbinowego wyraża się zmianą takiego symptomu jego stanu technicznego, którego zwiększanie się w czasie eksploatacji „ τ ” powoduje wzrost strumienia energii napędowej „ E_N ” dla zachowania stałej energii efektu użytecznego „ E_U ”.

Analizując nierówności (16) i (20) z uwzględnieniem warunków brzegowych (21) należy stwierdzić, iż istnieje tylko jedna postać funkcji, która spełnia powyższe określone warunki kryterialne [2, 3]:

$$E_N(\tau) = E_N(\tau_0) + \delta_1(\tau - \tau_0)^{\delta_2} \quad (22)$$

Dokonując analogicznych jak wyżej przekształceń uzyskano funkcję zmiany energii efektu użytecznego „ E_U ” w czasie eksploatacji „ τ ” [2,3]:

$$E_U(\tau) = E_U(\tau_0) + \delta_3(\tau - \tau_0)^{\delta_2} \quad (23)$$

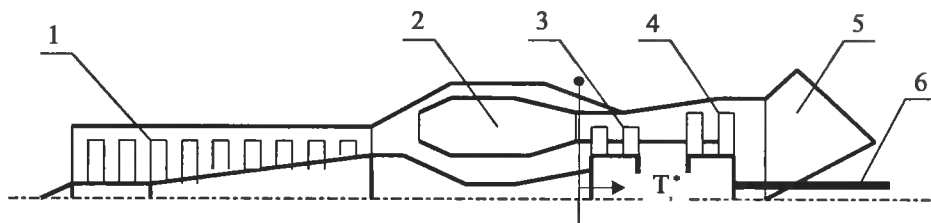
gdzie:

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ - parametry strukturalne, które ukazują wielkość zachodzącej destrukcji silnika turbinowego.

5. BADANIA EKSPLOATACYJNE TURBINOWYCH SILNIKÓW LOTNICZYCH

Badany turbinowy silnik lotniczy TW3-117W jest eksploatowany w składzie zespołu napędowego śmigłowca Mi-24W. Zespół ten stanowią dwa silniki turbinowe oraz przekładnia główna WR-24, która przekazuje napęd na wirnik nośny i śmigło ogonowe śmigłowca. Eksploatacja silnika turbinowego TW3-117W odbywa się w planowo-zapobiegawczym systemie obsługiwań technicznych, który jest budowany w oparciu o strategię według ilości wykonanej pracy [7,8].

Turbinowy silnik lotniczy TW3-117W składa się z następujących zespołów (rys. 4): 1 - dwunastostopniowa sprężarka osiowa posiadająca pięć regulowanych stopni łopatek aparatu kierującego, 2 - pierścieniowa komora spalania, 3 - dwustopniowa turbina sprężarki, 4 - dwustopniowa turbina napędowa, 5 - układ wylotowy, 6 - wał napędowy przekładni głównej, (T_3^* - miejsce pomiaru temperatury gazów przed turbiną sprężarki).

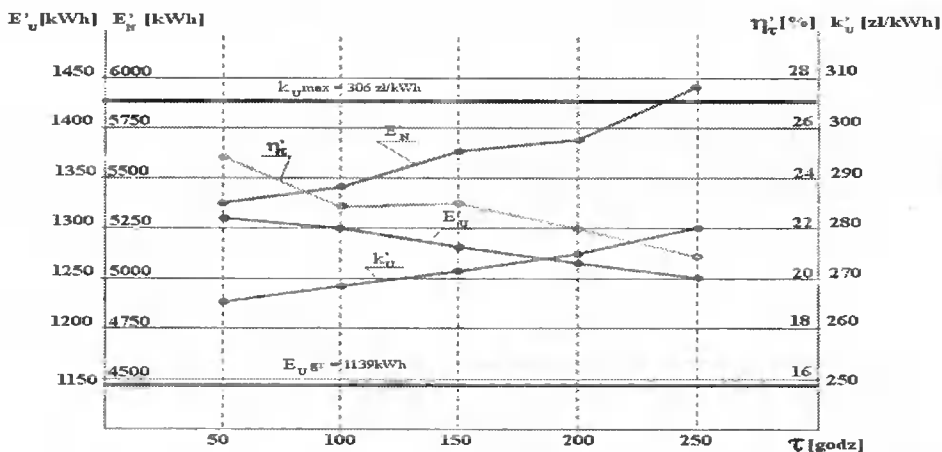


Rys. 4. Schemat silnika turbinowego TW3-117W

Z uzyskanych wyników badań silników turbinowych TW3-117W [1-3] dokonano obliczeń wartości średnich arytmetycznych „ E_U ”, „ E_N ”, „ η_τ ” i „ k_U ”, a następnie wyznaczono ich przebiegi w czasie eksploatacji „ τ ” (rys. 5).

Uzyskane wartości średnich arytmetycznych „ E_U ”, „ E_N ”, „ η_τ ” i „ k_U ” dla badanego typu silnika turbinowego są wykorzystywane do ustalenia [1-3]:

- modelu zmian stanu technicznego silnika turbinowego,
- czasu kolejnego diagnozowania silnika turbinowego,
- okresu racjonalnej eksploatacji silnika turbinowego.



Rys. 5. Przebieg zmian wartości średnich arytmetycznych „ E_U ”, „ E_N ”, „ η_τ ” i „ k_U ” badanych silników turbinowych

6. MODEL ZMIANY STANU SILNIKÓW

Badania eksperymentalne w oparciu o model energetyczny pozwalają na wyznaczenie parametrów strukturalnych „ δ_1 ”, „ δ_2 ” i „ δ_3 ”, których wartości określają zmiany zachodzące w strumieniu energii napędowej „ E_N ” oraz w energii efektu użytecznego „ E_U ” badanego silnika turbinowego TW3-117W w czasie eksploatacji „ τ ”.

Funkcja opisująca strumień energii napędowej „ $E_N(\tau)$ ” badanego silnika turbinowego przyjmuje postać [2]:

$$E_N(\tau) = 5601 + 1,45(\tau - \tau_0)^{0,9538} \quad (25)$$

Przedział ufności strumienia energii napędowej „ $E_N(\tau)$ ” liczony na poziomie ufności $\alpha^1 = 0,99$ dla:

$(\tau - \tau_0) = 50$ godzin pracy: wynosi: $5541 \leq E_N(\tau) \leq 5661$;

$(\tau - \tau_0) = 100$ godzin pracy: wynosi: $5486 \leq E_N(\tau) \leq 5716$.

Funkcja opisująca energię efektu użytecznego „ $E_U(\tau)$ ” badanego silnika turbinowego przyjmuje postać [2,3]:

$$E_U(\tau) = 1282 - 0,16(\tau - \tau_0)^{0,9531} \quad (26)$$

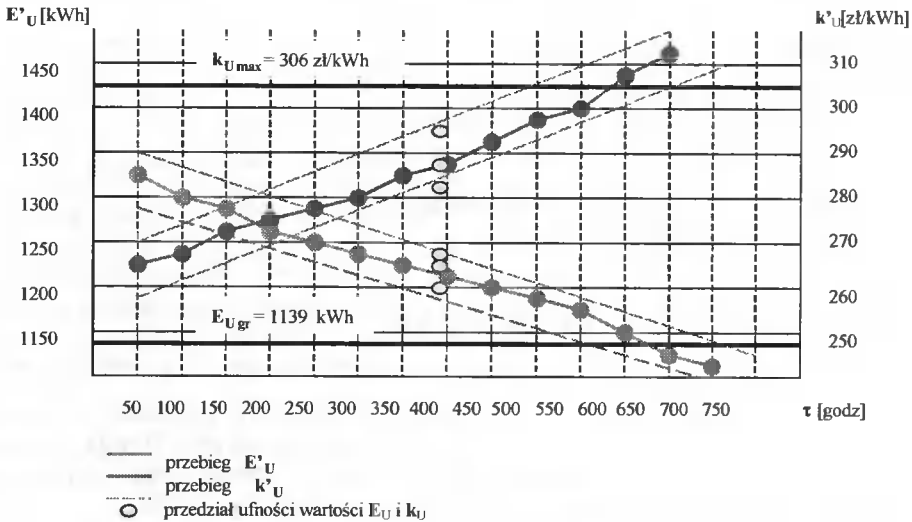
Przedział ufności energii efektu użytecznego „ $E_U(\tau)$ ” liczony na poziomie ufności $\alpha^1 = 0,99$ dla:

$(\tau - \tau_0) = 50$ godzin pracy wynosi: $1275 \leq E_U(\tau) \leq 1289$;

$(\tau - \tau_0) = 100$ godzin pracy wynosi: $1269 \leq E_U(\tau) \leq 1295$.

7. WYZNACZANIE OKRESU RACJONALNEJ EKSPLOATACJI SILNIKÓW

Na podstawie wyników badań, uwzględniając zaproponowane w pracy [1] relacje opisujące prognozowanie terminów kolejnych diagnozowań, wyznaczono prognozę zmian wartości energii efektu użytecznego „ E_U ” oraz kosztu wytwarzania energii efektu użytecznego „ k_U ” (z założonym prawdopodobieństwem $\alpha^1 = 0,99$), co przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Prognozowane wartości oraz przedziały ufności „ E_U ” i „ k_U ” badanego silnika

8. WNIOSKI KOŃCOWE

Dogodne narzędzia identyfikacji prostej i złożonej umożliwiają zamienne korzystanie z modeli analitycznych i opisu drganiowego badanych obiektów. Często jednak stosunkowo prosty opis analityczny przy pomocy (nowego) modelowania energetycznego jest równie efektywny, co przedstawiono w tej pracy w zakresie modelowania zmian stanu silników turbinowych.

Rozpatrując uzyskane wyniki badanych silników turbinowych należy zauważyć, że:

- spadek wartości energii efektu użytecznego „ E_U ” powoduje zmniejszenie sprawności energetycznej „ η_τ ”;
- utrzymanie odpowiedniej wartości energii efektu użytecznego „ E_U ”, poprzez dokonywanie regulacji silnika, wpływa na wzrost kosztu wytwarzania energii efektu użytecznego „ k_U ”;
- przedstawione przebiegi zmian energetycznych i kosztów badanych silników ukazują, iż pomimo spadku energii efektu użytecznego „ E_U ” oraz wzrostu kosztu wytwarzania energii efektu użytecznego „ k_U ” dalej mogą być eksplo-

towane, ponieważ po przepracowaniu 250 godzin nie zostały osiągnięte wartości graniczne (E_{Ugr} i k_{Umax}).

Doskonalenie metodologii modelowania stanu obiektów pozwala na rozwój możliwych do praktycznego stosowania nowych strategii eksploatacji, w których dobre modele gwarantują skuteczne algorytmy diagnozowania.

LITERATURA

- [1] Augustyn S., Żółtowski B., 1999. Diagnozowanie eksploatacyjne turbinowych silników śmigłowców. IV Konf. Nauk. WSO Toruń.
- [2] Augustyn S., Żółtowski B., 1999. Energy estimation of turbine engine. International Conference: Aircraft and Helicopter Diagnostics AIRDIAG'99, Warsaw.
- [3] Augustyn S., Żółtowski B., 2000. Niezawodność eksploatacyjna turbinowych silników lotniczych. VIII Sympozjum, Płock.
- [4] Barliński B., Stelmasczyk Z., 1981. Eksploatacja silników lotniczych. WKiŁ Warszawa.
- [5] Cempel C., 1998-2001. Procesor energii. Wiele publikacji.
- [6] Cempel C., 1994. Modele diagnostyki wibroakustycznej. Mat. Konf. Bydgoszcz - Borówno, ATR Bydgoszcz.
- [7] Żółtowski B., 1996. Podstawy diagnostyki maszyn. ATR Bydgoszcz.
- [8] Żółtowski B., 2001. Modal analysis in diagnostic of machines. 17th International Conference CARS@FOF, Durban, South Africa, 722-732.

MODELING IN IDENTIFYING DYNAMIC STATE FOR TURBINE ENGINE

Summary

The study presents modelling rules in identifying machine dynamic state. There have been offered modelling methods for technical diagnostics; preliminary turbine engines test in order to estimate and to forecast the technical condition and to define the engine exploitation policy, which is crucial for safety and cost-effectiveness.

Keywords: technical diagnostics, identifying, turbine engines

ISSN 0208-6395