

# 1

## DIAGNOZOWANIE POTENCJAŁU EKSPLOATACYJNEGO WĘZŁÓW CIEPLNYCH

### 1.1 WSTĘP

Pojęcie węzła cieplnego istnieje w ciepłownictwie i energetyce i jest rozumiane jako układ (zespół urządzeń) łączący zewnętrzną sieć ciepłą z instalacją wewnętrzną obiektu. Istnieją urządzenia/zespoły funkcjonalne zwane wymiennikami ciepła, których główną funkcją jest wymiana ciepła pomiędzy dwoma płynami. W niniejszym artykule węzeł cieplny jest każdą częścią urządzenia/maszyny, w którym dochodzi do wymiany energii cieplnej między dwoma płynami rozdzielonymi ciałem stałym. Płynem mogą być ciecze, gazy, zawiesiny w cieczy i gazie. Takie pojęcie wprowadza się celem budowy modeli, które mogą być wykorzystane w modelowaniu zespołów funkcjonalnych celem tworzenia relacji diagnostycznych koniecznych do diagnozowania potencjału eksploatacyjnego zespołów funkcjonalnych. Konieczność diagnozowania potencjału wynika z jego wyczerpywania się na skutek degradacji ciała stałego i płynów.

### 1.2 MIARY I SYMPTOMY POTENCJAŁU EKSPLOATACYJNEGO ZESPOŁÓW FUNKCJONALNYCH OBIEKTÓW SYSTEMU PRODUKCYJNEGO

Według norm ISO [7] jakość wyrobu to „ogół cech i właściwości wyrobu i usługi, decydujących o zdolności wyrobu lub usługi do zaspokajania stwierdzonych lub przewidywanych potrzeb”, a wymagania dotyczące własności danego wyrobu określone są w dokumencie zwanym „specyfikacją wyrobu”. W pracy [3] wprowadzono pojęcie „jakość przedsiębiorstwa” i „jakość systemu produkcyjnego” i na podstawie literatury zestawiono główne cechy jakości. Wskazano, że jakość systemu produkcyjnego ma bezpośredni wpływ na jakość wyrobu i jakość przedsiębiorstwa.

Ponieważ przedsiębiorstwo samo określa pożądane wartości cech przedsiębiorstwa, to cechy jakości obiektu systemu produkcyjnego i wartości miar tych cech powinny wynikać z dekompozycji cech i pożądanych wartości miar cech systemu produkcyjnego [1, 3]. Obiekty systemu produkcyjnego są wyrobami innych systemów produkcyjnych. Cykl życia wyrobu – obiektu systemu produkcyjnego w społecznej gospodarce rynkowej składa się z fazy projektowania, wytwarzania,

eksploatacji i likwidacji. Rzeczywiste cechy i wartości miar cech obiektu określone są w fazie rozwoju (projektowania) obiektu jako wyrobu, a pożądane wartości miar cech maszyny powinny wynikać z pożądanych cech jakości przedsiębiorstwa.

Projektowanie obiektu polega na wykonaniu specyfikacji obiektu w formie dokumentacji konstrukcyjnej i wykonawczej. Specyfikacja określa:

- przedziały wartości miar cech opisujących obciążenie obiektu (np. moment obrotowy, prędkość obrotowa),
- pożądane przedziały wartości miar cech materiału konstrukcyjnego elementów obiektu,
- pożądane przedziały wartości miar cech elementów obiektu (makrostruktury, kształtu i wymiarów elementów),
- pożądane przedziały wartości miar cech zespołów i elementów wbudowanych obiektu (np. luz, napięcie wstępne śrub, wcisk, szczelność, niewyważenie itp.),
- pożądane przedziały wartości miar cech płynów eksploatacyjnych (np. lepkość oleju).

Zakłada się, że jeżeli wszystkie wymienione miary będą miały wartości z pożądanego odpowiedniego przedziału, to obiekt jako całość otrzyma pożądane cechy o wartościach mieszczących się w pożądanym zakresie.

Wartości cech nadane podczas wytwarzania obiektu ulegają zmianie w wyniku zużywania podczas użytkowania obiektu. Skutki zużywania ujęte są w cechach opisujących system produkcyjny. Takie cechy nie występują w sposób bezpośredni w specyfikacji obiektu. Nie wszystkie cechy obiektu ulegają zmianie. Z tego względu wygodne jest posługiwanie się pojęciem „potencjał eksploatacyjny obiektu”. Potencjał eksploatacyjny obiektu można określić jako zbiór miar cech obiektu, których wartości:

- są wynikiem wytwarzania obiektu,
- zmniejszają się na skutek zużywania podczas użytkowania,
- mogą być przywrócone podczas remontu lub obsługi.

Problemem przy posługiwaniu się potencjałem eksploatacyjnym maszyny jest to, że [2]:

- w specyfikacji maszyny brak jest on-line mierzalnych cech bezpośrednio opisujących potencjał eksploatacyjny obiektu;
- liczba cech koniecznych do opisanie potencjału obiektu jest duża.

Ze względu na dużą liczbę cech koniecznych do opisanie potencjału pożądane jest wyznaczenie „miar zastępczych” – miar dających się wyznaczyć na podstawie wartości miar cech elementów wbudowanych, płynów eksploatacyjnych, obciążenia i ruchu względnego. Rozwiązaniem problemu może być posługiwanie się pojęciem „potencjału eksploatacyjnego zespołu funkcjonalnego obiektu”, a uzasadnieniem to, że:

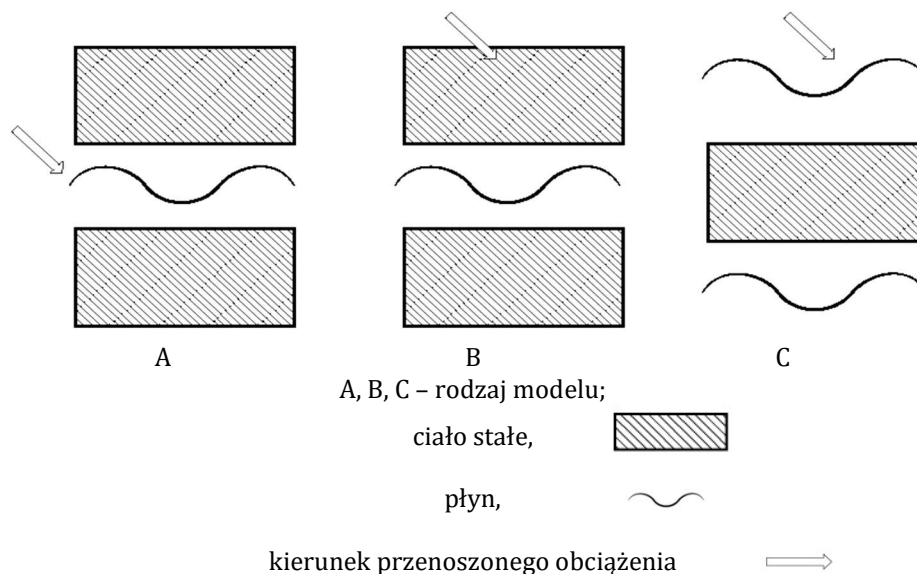
- potencjał eksploatacyjny obiektu jest wypadkową potencjału eksploatacyjnego jego zespołów funkcjonalnych,

- istnienie w obiekcie zespołów funkcjonalnych realizujących określone funkcje cząstkowe oznacza, że szybkość degradacji potencjałów eksploatacyjnych poszczególnych zespołów funkcjonalnych może być różna i może wymagać oddzielnego działania sanacyjnego,
- łączenie obiektów w agregaty odbywa się przez łączenie elementów wybranych zespołów funkcjonalnych. Powstają „nowe” zespoły funkcjonalne nie ujęte w specyfikacji obiektu.

Warunkiem koniecznym posługiwania się potencjałem eksploatacyjnym zespołów funkcjonalnych jest dekompozycja pożądaných wartości miar cech obiektu na pożądanę wartości miar potencjału zespołów funkcjonalnych.

Bezpośredni pomiar wartości miar potencjału eksploatacyjnego pracujących zespołów funkcjonalnych z reguły nie jest możliwy. Konieczny jest pomiar pośredni z wykorzystaniem sygnałów emitowanych przez elementy zespołu funkcjonalnego.

Elementy zespołu funkcjonalnego tworzą tzw. „węzły”. Zespół funkcjonalny można przedstawić jako sumę węzłów z tym, że jeden i ten sam element zespołu funkcjonalnego może wchodzić w skład kilku węzłów. W najprostszym przypadku zespół funkcjonalny może być jednym węzłem. Wyróżnić można trzy podstawowe modele węzłów zespołów funkcjonalnych [2], rys. 1.1:



**Rys. 1.1 Modele węzłów zespołów funkcjonalnych**

Źródło: [2]

- 1) dwa ciała stałe rozdzielone są płynem. Na płyn działa obciążenie hydrodynamiczne, które wymusza i determinuje ruch płynu względem ciał stałych, rys. 1.1A;
- 2) dwa ciała stałe rozdzielone są płynem, w którym zachodzą zjawiska znane z mechaniki płynów (hydrodynamiki, aerodynamiki, reologii). Na jedno z ciał, oprócz obciążenia mechanicznego, działać może obciążenie magnetyczne, elektryczne lub cieplne. Obciążenie mechaniczne wymusza i determinuje ruch

względny ciał stałych, rys. 1.1B. Taki węzeł nazywany jest również węzłem tribologicznym;

- 3) dwa płyny rozdzielone są ciałem stałym. Na płyny oprócz obciążenia hydrodynamicznego działać może obciążenie cieplne, elektryczne lub magnetyczne. Pod wpływem działających obciążeń odbywa się ruch względny płynów i/lub ruch względny płyn – ciało stałe, rys. 1.1C.

W literaturze tematu można znaleźć modele szczegółowe powyższych modeli podstawowych – modele uwzględniające kształt ciał stałych i właściwości fizykochemiczne płynów. W fizyczno-matematycznym opisie modeli szczegółowych stosuje się wielowymiarowe i/lub bezwymiarowe (liczby podobieństwa/liczby kryterialne) współczynniki proporcjonalności. Ponieważ współczynniki proporcjonalności są generalnie ilorazem wartości miar wybranych miar cech elementów wbudowanych, płynów eksploatacyjnych, obciążenia i ruchu względnego to można je uznać za zastępcze miary potencjału eksploatacyjnego danego węzła funkcjonalnego (przykładowo dwa węzły funkcjonalne o takiej samej danej liczbie podobieństwa mają taką samą wartość danej miary cechy potencjału eksploatacyjnego).

Dla konkretnych rozwiązań konstrukcyjnych zespołów funkcjonalnych można tworzyć modele będące kombinacją modeli szczegółowych [2]. Potencjał eksploatacyjny danego zespołu funkcjonalnego może być opisany wieloma liczbami podobieństwa/współczynnikami proporcjonalności powiązаныmi z symptomami o różnej formie energii i o różnym przebiegu mierzonego sygnału (przy zmiennym okresowo obciążeniu mogą mieć formę sygnałów okresowych). Jeden i ten sam sygnał może być nośnikiem wielu symptomów potencjału eksploatacyjnego.

Na skutek błędów wytwarzania i montażu elementów zespołu funkcjonalnego jego potencjał eksploatacyjny może, natychmiast po uruchomieniu maszyny, osiągnąć wartość graniczną i tym samym może rozpocząć się proces intensywnego zużywania kończący się awarią obiektu. Takie zdarzenia określane są jako uszkodzenia wczesne – np. około 50% uszkodzeń łożysk tocznych to właśnie uszkodzenia wczesne. Inne niż przewidziano w specyfikacji obiektu wartości miar cech obciążenia, ruchu lub cieczy eksploatacyjnych mogą również skutkować spadkiem potencjału zespołu funkcjonalnego do wartości granicznej i rozpoczynać intensywne zużywanie kończące się awarią obiektu. Przyczyny powodujące chwilowy spadek potencjału eksploatacyjnego nazywane są zakłóceniami, warunki powodujące permanentny spadek potencjału do wartości granicznej nazywane są „użytkowaniem obiektu/zespołu funkcjonalnego niezgodnie z przeznaczeniem” [2].

### 1.3 MODELOWANIE WĘZŁÓW CIEPLNYCH

Jeżeli zasadniczym obciążeniem węzła składającego się z ciała stałego rozdzielonego dwoma płynami (rys. 1.1C) jest obciążenie cieplne to taki węzeł można nazwać węzłem cieplnym. Miarą obciążenia cieplnego jest strumień ciepła  $\dot{Q}$ .

Strumień ciepła definiowany jest jako stosunek elementarnej ilości ciepła  $dQ$  do czasu trwania  $dt$  wymiany tej ilości ciepła:

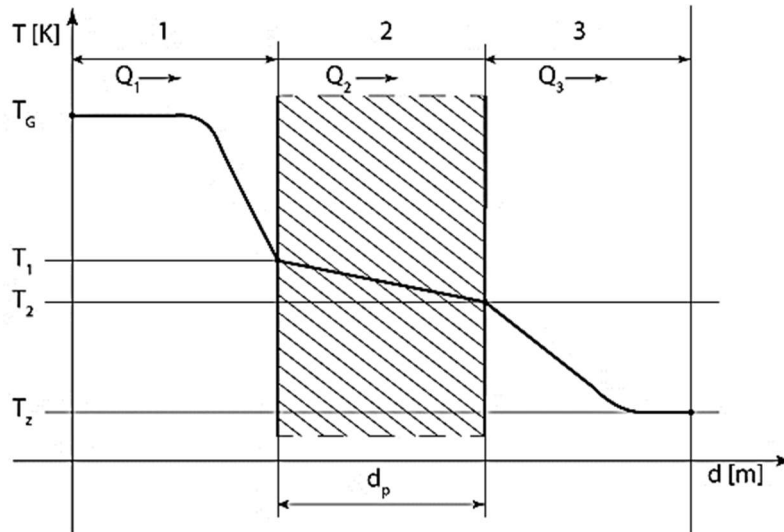
$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} W.$$

Możliwy jest przepływ ciepła przez ciało stałe i/lub wzrost energii wewnętrznej ciała stałego. Ciało stałe nazywane jest również przegrodą cieplną. Ciało stałe/przegroda może mieć budowę wielowarstwową np. dwa cylindry połączone wciskowo. W skali makro ciało stałe w formie materiału elementu maszyny jest niejednorodne, posiada rdzeń i warstwę wierzchnią oraz powłoki. Przez przegrodę przepływa ciepło – następuje wymiana ciepła między płynami. Przy różnicy temperatur następuje przechodzenie ciepła zawsze od temperatury wyższej do niższej. Wymiana ciepła może być ustalona lub nieustalona – przechodzenie ciepła może być stacjonarne lub niestacjonarne. Powierzchnia przegrody może mieć różny kształt. W znanych modelach węzłów cieplnych wyróżnia się [4, 8]:

- płaszczyznę/przegroda płaska/ścianka np. wymiennika płytowego, przewodnica łożyska ślizgowego, izolator termiczny itp.
- walec (powierzchnia walca)/przegroda cylindryczna: wymiennik typu „rura w rurze”, panewka i obudowa łożyska ślizgowego itp.

Transport ciepła ze źródła gorącego poprzez przegrodę do źródła zimnego odbywa się z udziałem przewodzenia ciepła, konwekcji i promieniowania. Udział poszczególnych zjawisk jest specyficzny dla danego węzła. Podczas przewodzenia ciepła molekuly ciała stałego, cieczy lub gazu oddają swoją energię drgań molekułom sąsiednim: położenie molekuł w przestrzeni nie zmienia się (impulsowa wymiana ciepła). Przenoszenie się energii z jednego ośrodka do drugiego następuje po zetknięciu się ośrodków. Konwekcja wymaga ruchu molekuł: molekuly płynu poruszają się w przestrzeni przenosząc przy tym ciepło. W przypadku konwekcji swobodnej (naturalnej) ruch molekuł wymuszony jest różnicami gęstości (np. cyrkulacja powietrza), natomiast w przypadku konwekcji wymuszonej ruch molekuł wymuszony jest różnicą ciśnień (pompy, wentylatory). Promieniowanie to transport energii w formie promieniowania elektromagnetycznego (bez udziału medium przenoszącego). Strumień ciepła przed przegrodą i za przegrodą (rys. 1.2, strefa 1 i 3) może być wynikiem przewodzenia, konwekcji i promieniowania, natomiast strumień ciepła w przegrodzie (strefa 2, rys. 1.2) jest wyłącznie wynikiem przewodzenia.

Każde z wymienionych powyżej zjawisk charakteryzuje się innym przebiegiem spadku temperatury w kierunku przepływu ciepła. Rys. 1.2 przedstawia przebieg spadku temperatury dla węzła, w którym w strefie 1 i 3 transport ciepła następuje głównie przez konwekcje.



**Rys. 1.2 Przebieg spadku temperatury dla węzła ciecz - przegroda - ciecz:**  
 $d$  - droga transportu ciepła,  $d_p$  - grubość przegrody,  
 $T_G$  - temperatura źródła gorącego (temperatura w strumieniu płynu),  
 $T_z$  - temperatura źródła zimnego,  $T_1, T_2$  - temperatura na styku ciecz - ciało stałe,  
 1, 3 - konwekcja, 2 - przewodzenie ciepła

Strumień ciepła przepływający przez płaską przegrodę, rys. 1.2, modelowany jest [4, 8] jako jednowymiarowe, stacjonarne przewodzenie ciepła: temperatura zmienia się tylko w jednym kierunku, lokalna temperatura jest stała w czasie.

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{d_p} A (T_1 - T_2)$$

gdzie:

- $\lambda$  współczynnik proporcjonalności zw. współczynnikiem przewodzenia ciepła lub przewodnością cieplną  $\frac{W}{mK}$  (nachylenie linii  $T = f(d)$  jest proporcjonalne do wartości  $\lambda$ ),
- $A$  powierzchnia przegrody mierzona prostopadle do kierunku przepływu ciepła  $m^2$ ,
- $(T_1 - T_2) = \Delta T$  - różnica temperatur po obydwu stronach powierzchni przegrody K.

Dla ścianki o wielu warstwach, przy stacjonarnym przepływie przez płaską przegrodę:

$$d_p = d_1 + d_2 + d_n$$

$$\dot{Q} = A \frac{\Delta T}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}}$$

W literaturze można znaleźć odpowiednie wzory dla innych kształtów przegrody.

Proces przechodzenia ciepła ze strumienia płynu do przegrody (i na odwrót) nazywany jest wnikaniem ciepła. Wnikanie opisuje się za pomocą prawa Newtona [4, 8]:

$$\dot{Q} = A \alpha \Delta T$$

gdzie:

$\alpha$  – współczynnik wnikania ciepła  $W/m^2K$ ,

$\Delta T$  – różnica temperatur między płynem i ścianką.

Dla przykładu z rys. 1.2 odpowiednio:  $\dot{Q}_1 = A\alpha_G(T_G - T_1)$ ,  $\dot{Q}_3 = A\alpha_Z(T_2 - T_Z)$

Proces przechodzenia ciepła ze strumienia płynu o wyższej temperaturze poprzez przegrodę do strumienia płynu o niższej temperaturze nazywany jest przenikaniem ciepła. Strumień ciepła przenikającego poprzez płaskie przegrody opisuje się jako [4, 8]:

$$\dot{Q} = Ak\Delta T$$

gdzie:

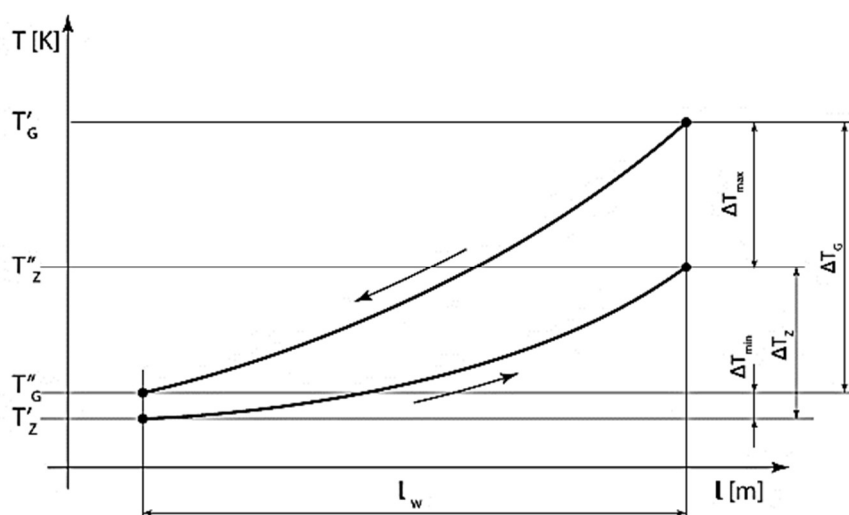
$k$  – współczynnik przenikania ciepła  $\frac{W}{m^2K}$

Dla przykładu z rys. 1.2:

$$\Delta T = T_G - T_Z,$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_G} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_Z}}$$

Temperatura na powierzchni przegrody przy ustalonej wymianie ciepła nie jest jednakowa – rozkład temperatury jest zależny od kierunku strumienia płynu wymieniającego ciepło. W węzłach typu „rura w rurze” temperatura zmienia się wzdłuż tworzących walca. Pożądana jest znajomość rozkładu temperatury wzdłuż przedmiotowej linii na obu powierzchniach przegrody. Wyznacza się średnią różnicę temperatur  $\Delta T$ . Uniwersalną miarą średniej temperatury  $\Delta T$  jest średnia logarytmiczna różnica temperatur  $\Delta T_m$ . Sposób wyznaczania średniej logarytmicznej różnicy temperatur przedstawiono za [8] na rys. 1.3 na przykładzie przeciwprądowego wymiennika ciepła.



**Rys. 1.3 Przebieg temperatury w funkcji drogi strumienia płynu w węzle o przeciwnych kierunkach strumieni płynu w warunkach adiabatycznych:**

$l_w$  – długość wymiennika;

$T_G', T_Z'$  – temperatura początkowa (na wlocie) strumienia płynu gorącego i zimnego;

$T_G'', T_Z''$  – temperatura płynu końcowa (na wylocie).

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}\right)}$$

Średnia logarytmiczna różnica temperatur  $\Delta t_m$  jest wg [4] niezależna od kierunku przepływów.  $\Delta T_{max}$  i  $\Delta T_{min}$  to zawsze różnice pomiędzy temperaturami płynu po danej jednej stronie wymiennika.

W [5] wskazano na możliwość eksperymentalnego wyznaczenia współczynnika  $k$  – współczynnik przenikania ciepła.

Z bilansu cieplnego/energetycznego węzła cieplnego wynika, że:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3 = Ak\Delta T_m$$

ponieważ strumień ciepła w strumieniu płynu:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_G c_{vG} \Delta T_G$$

$$\dot{Q}_3 = \dot{m}_Z c_{vZ} \Delta T_Z$$

to

$$k = \frac{\dot{m}_G c_{vG} \Delta T_G}{A \Delta T_m} = \frac{\dot{m}_Z c_{vZ} \Delta T_Z}{A \Delta T_m}$$

gdzie:

$\dot{m}_G, \dot{m}_Z$  – masowe natężenie strumienia płynu gorącego i zimnego,

$c_{vG}, c_{vZ}$  – ciepło właściwe przy stałej objętości płynu gorącego i zimnego.

#### 1.4 WSPÓŁCZYNNIK PRZENIKANIA JAKO MIARA POTENCJAŁU EKSPLOATACYJNEGO WĘZŁA CIEPLNEGO

Na współczynnik przenikania ciepła  $k$  węzła cieplnego z rys. 1.1.C składa się współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$  i współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$ .

Współczynnik  $\lambda$  W/mK jest wielkością charakteryzującą dany ośrodek/materiał pod względem zdolności do przewodzenia/izolacji ciepła. Jest właściwością materiału – stałą materiałową wyznaczalną eksperymentalnie.

Współczynnik wnikania wynika z definicji liczby Nusselta [4, 8]:

$$\alpha = \frac{N_u \lambda_p}{L}$$

gdzie:

$\lambda_p$  – przewodność cieplna nieruchomego płynu,

$L$  – długość charakterystyczna węzła cieplnego. W przypadku kanałów – średnica hydrauliczna, w pozostałych przypadkach – długość strumienia płynu,

$N_u$  – liczba Nusselta. Liczba Nusselta zależna jest od innych liczb podobieństwa: Reynoldsa, Prandtla, Grashofa, Frouda.

Z definicji liczb podobieństwa opisujących liczbę Nusselta wynika, że współczynnik wnikania  $\alpha$  zależy od:

- fizycznych właściwości materiałów przegrody i płynów,
- geometrii przegrody i geometrii strumienia płynu,
- właściwości powierzchni przegrody (m. innymi profilu),
- prędkości płynu względem przegrody.



Na skutek obciążenia cieplnego zgodnie z [6]:

- w przegrodzie, zależne od stopni swobody przegrody pojawia się:
  - stan odkształceń,
  - stan naprężeń (w przegrodach o ograniczonych stopniach swobody),
  - odkształcenie trwałe;
- w materiale przegrody możliwe są zmiany strukturalne. Zachodzą zjawiska [6]:
  - kumulowania się energii w materiale,
  - dyslokacji,
  - pełzania,
  - relaksacji naprężeń,
  - wzrostu objętości,
  - przemian fazowych: w wielu przypadkach, w wyniku wielokrotnego powtarzania tych przemian pojawiają się mikroszczeliny oraz inne nieciągłości naruszające materiał, co prowadzi do znacznych zmian kształtu i objętości przegrody,
  - aktywizacja:
    - utlenianie,
    - dyfuzja.

Obciążenie cieplne przyspiesza degradację płynów, między innymi następuje zmiana lepkości. Na styku płyn – przegroda:

- możliwe jest zużycie erozyjne (erozja) i korozyjne (korozja) materiału przegrody na skutek oddziaływania płynu transportującego ciepło;
- możliwe jest wydzielanie z płynu na powierzchnię przegrody (odkładanie zanieczyszczeń). Korozja i wydzielanie powodują powstawanie na powierzchni przegrody powłok o nierównomiernej grubości.

Obrazy uszkodzeń przegrody można znaleźć np. w [9].

## 1.5 PODSUMOWANIE

Współczynnik przenikania ciepła  $k$  jest zastępczą miarą potencjału eksploatacyjnego: zależy od cech materiałów, kształtu elementów wbudowanych, płynów eksploatacyjnych, wielkości opisujących ruch i obciążenie. Współczynnik przenikania ciepła może mieć wartość od wartości  $k_1$  do wartości  $k_2$ :

$$k_1 \leq k \leq k_2$$

gdzie:

$k_1$  – 100% potencjału eksploatacyjnego węzła,

$k_2$  – 0% potencjału eksploatacyjnego węzła.

Zużycie cieplne i erozyjne skutkuje zmianą cech decydujących o potencjale eksploatacyjnym węzła cieplnego. Następuje zmiana rzeczywistej wartości współczynnika przenikania ciepła  $k$ .

Współczynnik  $k$  jako zastępcza miara potencjału eksploatacyjnego węzła cieplnego jest diagnozowalny. Miarą symptomu potencjału eksploatacyjnego węzła cieplnego jest iloczyn masowego natężenia przepływu płynu gorącego lub zimnego

$m_{G/Z}$  i stosunku  $\Delta T_{G/Z}/\Delta T_m$  zmiany temperatury  $\Delta T$  płynu odpowiednio gorącego lub zimnego do średniej logarytmicznej różnicy temperatur  $\Delta T_m$ .

#### LITERATURA

1. P. Bielawski. *Identyfikacja obiektów technicznych systemów produkcyjnych*. Szczecin: Akademia Morska w Szczecinie, 2014.
2. P. Bielawski. „Miary i wartości graniczne potencjału eksploatacyjnego maszyn systemów produkcyjnych/Measures and limits of machine wear margin of production systems”. *Problemy eksploatacji/Maintenance problem* nr 1/2016, pp. 129-151.
3. P. Bielawski. „Zrównywanie wartości miar cech obiektów technicznych”. *Pomiary Automatyka Robotyka* nr 4/2014, pp.80-87.
4. R. Domański, M. Jaworski, M. Rebow, J. Kołtyś. *Wybrane zagadnienia termodynamiki w ujęciu komputerowym*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2000
5. E. Moeck, H. Strickert. *Technische Diagnostik an Schiffsmaschinenanlagen*. Berlin: Verlag Technik, 1982
6. Z. Orłoś(Ed.). *Naprężenia cieplne*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1991
7. PN-EN ISO 9000: 2006. „Systemy zarządzania jakością. Podstawy i terminologia”.
8. V. Sperlich. *Grundlagen der Technischen Thermodynamik*. Essen: Universität Duisburg, 2007
9. E. Zbroińska-Szczuchura, J. Dobosiewicz. „Uszkodzenia i diagnostyka wymienników ciepła w elektrociepłowniach”. *Energetyka*, nr 12/2004 pp. 796(12)-800(16). Pobrano z: [www.elektroenergetyka.pl](http://www.elektroenergetyka.pl)

Data przesłania artykułu do Redakcji: 05.2016

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 12.2016

**prof. dr hab. inż. Piotr Bielawski**

Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Mechaniczny

Katedra Diagnostyki i Remontów Maszyn

ul. Willowa 2-4, 71-650 Szczecin, POLSKA

e-mail: p.bielawski@am.szczecin.pl

## DIAGNOZOWANIE POTENCJAŁU EKSPLOATACYJNEGO WĘZŁÓW CIEPLNYCH

**Streszczenie:** *Przedstawiono filozofię budowania relacji diagnostycznych w oparciu o potencjał eksploatacyjny węzłów zespołów funkcjonalnych. Opisano model węzła cieplnego. Wykazano, że współczynnik przenikania ciepła jest zastępczą miarą potencjału eksploatacyjnego węzła cieplnego. Przedstawiono relacje współczynnik przenikania ciepła – miara symptomu diagnostycznego. Scharakteryzowano przedział wartości miary symptomu.*

**Słowa kluczowe:** *potencjał eksploatacyjny, węzły zespołów funkcjonalnych, węzeł cieplny, współczynnik przenikania ciepła*

## DIAGNOSING THE WEAR MARGIN OF THERMAL NODES

**Abstract:** *The philosophy of building diagnostic relationships based on the wear margin of functional units nodes is presented. A model of the thermal node has been described. It has been shown that the heat transfer coefficient is a surrogate measure of the wear margin of a thermal node. The relationship between the heat transfer coefficient and the measure of diagnostic symptom is presented. The range of symptom measure values has been characterized.*

**Key words:** *wear margin, nodes of functional units, thermal node, heat transfer coefficient*