

Arkadiusz STACHOWIAK*, Wiesław ZWIERZYCKI*

OBLICZANIE ZUŻYCIA KOROZYJNO- -MECHANICZNEGO Z WYKORZYSTANIEM TEORII PĘKANIA MATERIAŁÓW

CORROSIVE AND MECHANICAL WEAR CALCULATION AT HELP OF CRACK PROPAGATION THEORY

Słowa kluczowe:

zużywanie, korozja, propagacja pęknięcia

Key-words:

wear, corrosion, crack propagation

Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję matematycznego modelowania procesu zużywania powierzchniowego opartą na założeniu, że przyczyną odrywania mikroobjętości materiału jest propagacja pęknięć wzdłuż granic tych mikroobjętości. Analizy dotyczą warunków, w których wzrost szczeliny powodowany jest cyklicznymi zmianami obciążenia oraz działaniem środowiska korozyjnego.

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych,
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

WSTĘP

Od kilku lat autorzy artykułu zajmują się matematycznym modelowaniem procesów zużywania w warunkach jednoczesnych oddziaływań korozyjnych i mechanicznych [L. 1], [L. 2]. Rezultatem tych działań jest program komputerowy umożliwiający pełną symulację przebiegu zużycia korozyjno-mechanicznego powierzchni chropowatych w skojarzeniu pin – on-disc. Tworząc algorytm programu przyjęto następujące założenia:

- powierzchnia chropowata metalu modelowana jest układem przylegających do siebie prostopadłościów; każdy z nich odpowiada pojedynczej mikronierówności,
- oddziaływania korozyjne i mechaniczne analizowane są w obrębie pojedynczych mikrowystępów nierówności powierzchni,
- mechaniczne oddzielenie fragmentu materiału następuje wskutek kumulacji odkształceń (cykliczne ściskanie mikrochropowatości w obszarze styku i powrót do pierwotnych rozmiarów po opuszczeniu strefy styku),
- procesy korozyjne przebiegają w obszarach „świeżo odsłoniętych” wskutek mechanicznego oderwania fragmentów mikrochropowatości.

Taki model interpretacyjny mechanizmów niszczących nie wystarcza do opisanie wszystkich możliwych form zużywania w warunkach jednoczesnych oddziaływań korozyjnych i mechanicznych. Poszukiwano zatem alternatywnych metod matematycznego opisu zachodzących zjawisk.

MODEL G.P. CZEREPANOWA

Oryginalną koncepcję opisu zużywania korozyjno-mechanicznego zaproponował G.P. Czerepanow [L. 3], [L. 4]. Wykorzystał on teorię pękania materiałów zakładając, że niszczenie elementu następuje wskutek propagacji mikroszczelin. Podstawowymi przyczynami rozwoju mikroszczelin w metalach są:

- cykliczne zmiany obciążenia,
- procesy elektrochemiczne zachodzące przy „dnie” pęknięcia.

W celu wyznaczenia szybkości propagacji mikroszczeliny z uwzględnieniem wzajemnych oddziaływań między wymienionymi mechanizmami G.P. Czerepanow zastosował regułę addytywności. W każdym cyklu wymuszeń wzrost długości szczeliny dzielony jest na składowe odpowiadające poszczególnym procesom niszczącym.

W przypadku cyklicznych zmian obciążenia i braku termicznej aktywacji szybkość propagacji szczeliny w metalach w próżni lub środowisku obojętnym zależna jest od naprężeń plastycznych przy końcu pęknięcia. Szybkość tę w zakresie podkrytycznym można wyznaczyć na podstawie wzoru:

$$-\beta \left(\frac{K_{\max}^2 - K_{\min}^2}{K_C^2} + \ln \frac{K_C^2 - K_{\max}^2}{K_C^2 - K_{\min}^2} \right) \quad (1)$$

gdzie:

- n – liczba cykli zmian obciążenia,
- K_C – odporność na pękanie,
- K_{\min}, K_{\max} – min. i max. wartość współczynnika intensywności naprężeń w cyklu,
- β – współczynnik.

Jeżeli obok lokalnych odkształceń plastycznych następuje miejscowe roztwarzanie anodowe (a efekty obu tych procesów są porównywalne), szybkość propagacji szczeliny można opisać następującą zależnością:

$$\frac{dl}{ln} = \int_0^{T_1} f[K(t)] dt - \beta \left(\frac{K_{\max}^2 - K_{\min}^2}{K_C^2} + \ln \frac{K_C^2 - K_{\max}^2}{K_C^2 - K_{\min}^2} \right) \quad (2)$$

gdzie:

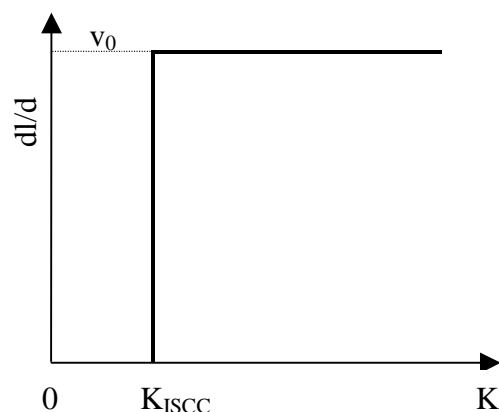
- K – współczynnik intensywności naprężeń,
- f [K(t)] – funkcja charakteryzująca szybkość rozwoju mikroszczeliny korozyjnej.

G.P. Czerepanow uwzględnił wpływ środowiska na przebieg procesu zużycia wprowadzając człon zawierający f[K(t)]. Przy lokalnym roztwarzaniu anodowym funkcja ta ma następującą postać:

$$\frac{dl}{dt} = \begin{cases} 0 & K_I < K_{ISCC} \\ v_0 & K_{ISCC} < K_I \end{cases} \quad (3)$$

gdzie: K_{ISCC} – progowa wartość współczynnika intensywności naprężeń.

Na **Rys. 1** pokazano typowy przebieg zależności szybkości propagacji szczeliny od współczynnika intensywności naprężeń dla lokalnego roztwarzania anodowego.



Rys. 1. Zależność szybkości propagacji szczeliny (dl/dt) od współczynnika intensywności naprężeń dla lokalnego roztwarzania anodowego [L. 3]

Fig. 1. The diagram crack growth rate (dl/dt) – factor K for the electrochemical mechanism of crack growth

Na niejednorodnej powierzchni stopu zanurzonej w elektrolicie powstają mikroskopijne ogniwa galwaniczne powodując rozkład bardziej aktywnych składników stopu. Utworzone w ten sposób „dziury” działają jak koncentratory naprężeń. Pod wpływem zewnętrznych naprężeń rozciągających dochodzi do propagacji szczeliny. W obszarze dna szczeliny następuje elektrochemiczny rozkład metalu oraz lokalne pęknięcie osłabionego materiału. Warstwa „korozyjna” jest całkowicie otoczona przez strefę plastyczną pełniącą rolę tarczy, dzięki czemu tempo propagacji szczeliny nie zależy od współczynnika intensywności naprężeń.

W procesie rozwoju wielu pęknięć korozyjnych można wyróżnić tunelowy mechanizm elektrochemiczny, składający się z następujących etapów:

- rozkład obszarów anodowych i tworzenie wgłębień w formie mikrotunelu w dnie szczeliny,
- uszkodzenie osłabionej warstwy przy dnie szczeliny pod wpływem obciążeń zewnętrznych,
- hydrodynamiczny ruch elektrolitu w szczelinie.

Kinetykę rozwoju pęknięcia determinuje najwolniejszy proces. W tym wypadku będzie to pierwszy z wymienionych etapów – proces elektrochemiczny, który zależy od transportu jonów w mikrotunelu. Szybkość propagacji szczeliny będzie determinowana intensywnością procesów przebiegających przy jej „dnie”.

Charakterystyczna wartość szybkości propagacji szczeliny korozyjnej v_0 może być wyznaczona w stacjonarnym eksperymencie mechaniki pęknięcia. Analityczne oszacowanie tej wielkości jest możliwe w oparciu o analizę kinetyki zachodzących reakcji.

W początkowej części szczeliny w każdym przedziale czasu spełnione są równania opisujące kinetykę reakcji elektrochemicznych:

$$D_i \frac{\partial c_i}{\partial n} + \frac{D_i z_i F}{RT} c_i \frac{\partial \phi}{\partial n} = f_i(c_i, \phi) \quad \phi = \phi_0 \quad (4)$$

Tempo wzrostu szczeliny V można wyznaczyć w oparciu o prawo zachowania masy:

$$\frac{\varepsilon \rho V}{m} = D_M \frac{\partial c_M}{\partial n} + D_M \frac{z_M F}{RT} c_M \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (5)$$

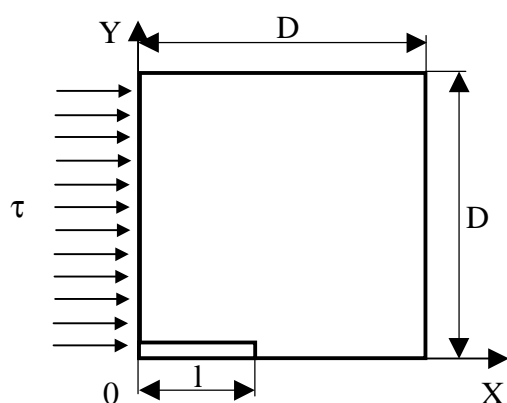
gdzie:

- ϕ – potencjał,
- m – masa jonów metalu ulegających rozkładowi przy dnie szczeliny,
- ρ – gęstość materiału,
- D_M, c_M, z_M – współczynnik dyfuzji, stężenie i wartościowość jonów metalu ulegających rozkładowi,
- N – kierunek wzdłuż szczeliny,
- ε – udział składnika anodowego w stopie.

Wartości funkcji f_i mogą być wyznaczone doświadczalnie lub obliczone na podstawie zależności teoretycznych. Są one związane z reakcją anodową (w szczególnym przypadku, jeśli „strumień” jonów typu „i” przy dnie szczeliny wynosi $0 \rightarrow f_i = 0$).

MODEL ZUŻYWANIA

Autorzy artykułu postanowili wykorzystać model propagacji mikroszczeliny (proces zachodzący w objętości elementu węzła maszyny) do opisu zużycia powierzchniowego. Transformację taką umożliwia przyjęte w pracy [L. 4] założenie modelowe zgodne, z którym materiał składa się z przylegających do siebie jednakowych elementów strukturalnych. Mają one kształt sześcianu o krawędzi D (Rys. 2). W układzie pionowym elementy te tworzą warstwy. Niszczenie powierzchniowe (zużywanie) następuje w wyniku rozwoju mikroszczelin wzdłuż ścianek sześcianów. Proces ten zachodzi w warstwie wierzchniej. W momencie kiedy mikroszczelina osiągnie długość równą krawędzi sześcianu następuje odrywanie elementu strukturalnego od podłoża.



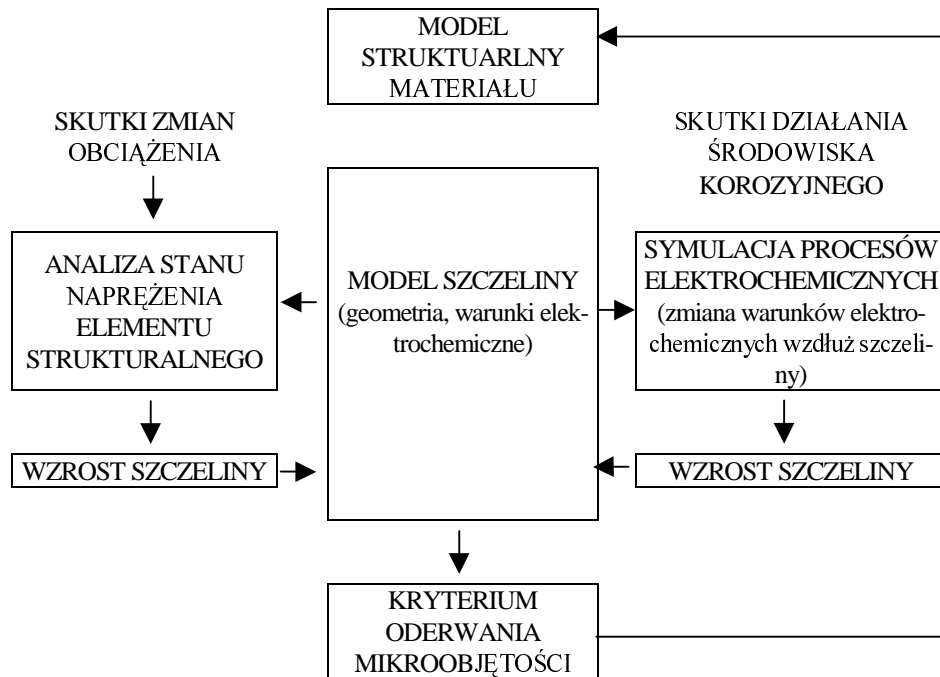
Rys. 2. Element strukturalny materiału [L. 4]

Fig. 2. Element of structural material

Ogólną koncepcję modelowania procesów powierzchniowego zużycia korozyjno-mechanicznego z wykorzystaniem teorii propagacji mikropęknięć pokazano schematycznie na Rys. 3.

Istotną częścią algorytmu jest model strukturalny materiału (podział na elementy stanowiące obiekt analiz numerycznych). Model ten umożliwia:

- analizowanie oddziaływań korozyjnych i mechanicznych w obrębie odpowiednio wydzielonych mikroobszarów (mikroobjętości),
- modyfikowanie kształtu powierzchni w miarę odrywania kolejnych mikroobjętości.



Rys. 3. Koncepcja modelowania zużycia powierzchniowego

Fig. 3. Idea of wear modelling

W poprzednich pracach [L. 1], [L. 2] autorzy artykułu za element strukturalny materiału (w analizach numerycznych) przyjmowali pojedyncze mikrochropowatości. Stosowano tzw. pręcikowy model powierzchni chropowatej. W obecnym ujęciu perspektywną metodą modelowania struktury materiału może okazać się wykorzystanie fraktali.

Numeryczny model szczeliny obejmuje:

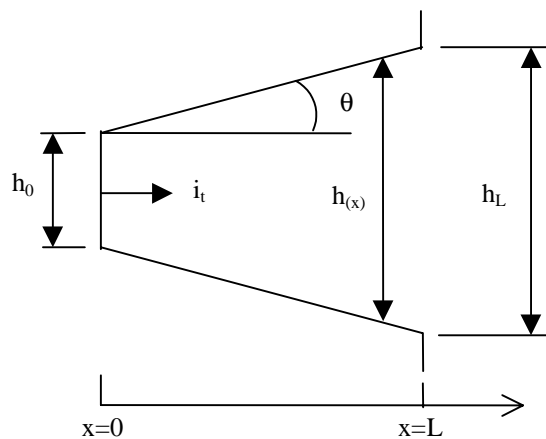
- opis geometrii mikropełknięcia,
- charakterystykę warunków elektrochemicznych na całej długości szczeliny (zmiany potencjału, stężenia jonów, gęstości prądu korozyjnego).

Parametry modelu opisując stan mikropełknięcia w danej chwili stanowią podstawę do prognozowania skutków oddziaływań korozyjnych i mechanicznych w następnym przedziale czasu. Po wykonaniu takiej prognozy następuje korekta modelu.

Głównym problemem związanym z prognozowaniem propagacji pęknięcia jest analityczne oszacowanie zmieniających się wzdłuż szczeliny warunków elektrochemicznych. Mimo, że większość badaczy od lat stosuje tę samą, uznaną koncepcję opisu zjawisk elektrochemicznych w szczelinie (wzory 4–5), nie opracowano do tej pory takiej metody wyznaczania szybkości propagacji pęknięcia korozyjnego, którą można by zastosować z powodzeniem w praktyce inżynierskiej do projektowania trwałości węzłów maszyn. Główne problemy związane są właśnie z prognozowaniem zachodzących wzdłuż szczeliny zmian stężenia jonów, przewodności roztworu oraz potencjału elektrycznego. Wyniki badań wskazują, że uwzględnienie zróżnicowania warunków elektrochemicznych przyczynia się do zwiększenia precyzji symulacji.

Publikowane w ostatnich latach modele [L. 6], [L. 7], [L. 8] propagacji szczeliny korozyjnej dotyczą procesów zachodzących na powierzchni próbek rozciąganych w środowiskach elektrolitycznych przy zachowaniu stałej prędkości odkształcenia. W pracach tych przyjmuje się następujące założenia:

- szczelina ma w przekroju wzdłużnym kształt trapezu (Rys. 4); jej szerokość przy „dnie” wynosi około $1\ \mu\text{m}$,



Rys. 4. Geometria szczeliny [L. 7]

Fig. 4. Crack geometry

- wartość połowy kąta rozwarcia szczeliny opisuje zależność:

$$\theta \cong \frac{\dot{\varepsilon}}{2N \cdot V} \quad (6)$$

gdzie:

- $\dot{\varepsilon}$ – szybkość rozciągania próbki,
- N – liczba pęknięć przypadająca na jednostkę długości,
- V – szybkość propagacji szczeliny,

- gęstość prądu (i_t) w obszarze „dna” szczeliny można wyrazić jako funkcję prędkości pęknięcia (V):

$$i_t = \frac{V \cdot \rho \cdot n \cdot F}{M_a} \quad (7)$$

gdzie:

- ρ – gęstość materiału,
- M_a – masa atomowa materiału.

- prąd płynący w szczelinie ma stałą wartość w każdym przekroju poprzecznym.

W większości prac przyjmuje się, że różnica potencjału między „dnem” szczeliny a powierzchnią materiału musi być wyznaczona doświadczalnie. Nieliczne próby [L. 8] analitycznego oszacowania tego parametru polegają na wykorzystaniu równania Laplace’a do opisu zjawisk elektrochemicznych w obrębie szczeliny.

ZAKOŃCZENIE

W chwili obecnej opracowano program komputerowy pozwalający oszacować szybkość propagacji szczeliny powstającej na powierzchni próbki poddawanej rozciąganiu w środowiskach elektrolitycznych.. Algorytm programu oparto na zaproponowanym przez R.C. Newmana [L. 7] modelu propagacji pęknięć w warunkach stałej prędkości odkształcania, wprowadzając dodatkowe moduły prognozujące zmiany warunków elek-

trochemicznych wzdłuż szczeliny. Wyniki obliczeń są porównywalne (ten sam rząd wielkości) z rezultatami eksperymentów. Istotną zaletą programu jest to, że wymaga on wprowadzenia relatywnie niewielu danych. W dodatku są to informacje o charakterze podstawowym (łatwe do pozyskania). Wszelkie specyficzne charakterystyki procesu (zwłaszcza elektrochemiczne) są bowiem wyznaczane analitycznie przez wewnętrzne moduły programu.

Trwają prace związane z adaptacją obecnej wersji programu do analizowania oddziaływań korozyjno-mechanicznych w odniesieniu do mniejszych elementów strukturalnych.

BIBLIOGRAFIA

1. Stachowiak A.: Kształtowanie niezawodności kinematycznych węzłów maszyn podlegających zużyciu korozyjno-mechanicznemu, rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, 2002.
2. Zwierzycki W. (red.): Modele prognostyczne korozyjno-mechanicznego zużycia elementów maszyn. ITE, Radom-Poznań 2002.
3. Cherepanov A.G., Cherepanov G.P.: K teorii ustalostno – korroziionnogo iznašivanija metallov. Fiziko – Chimičeskaja Mechanika Materialov, 1987, nr 1, s. 3-6.
4. Cherepanov G.P.: Mechanics of Brittle Fracture. McGraw-Hill International Book Company, 1979.
5. Zwierzycki W.: Wybrane zagadnienia zużycia się materiałów w ślizgowych węzłach maszyn. . PWN Warszawa-Poznań 1990.
6. Zhang S., Haruna T., Shibata T.: Initiation and propagation of IGSCC for sensitized type 304 stainless steel in dilute sulfate solutions. Corrosion Science, vol. 39, nr 9, 1997, s. 1725 – 1739.
7. Newman R.C.: Developments in the slip-dissolution model of stress corrosion cracking. Corrosion, vol. 50, nr 9, 1994, s. 682 - 686.
8. Turnbull A.: Modelling of crack chemistry in sensitized stainless steel in boiling water reactor environments. Corrosion Science, vol. 39, nr 4, 1997, s. 789 – 805.

Recenzent:
Jan BURCAN

Summary

In this paper the new concept of the corrosive – mechanical wear calculation was presented. The new algorithm, based on the crack propagation theory (models of the G.P. Cherepanov and R.C. Newman), was elaborated as well. The results of the calculation are similar to the results of experiments.