

Arkadiusz STACHOWIAK, Wiesław ZWIERZYCKI
Politechnika Poznańska, Poznań

PROGNOZOWANIE PRĘDKOŚCI PROPAGACJI PĘKNIĘCIA KOROZYJNO-ZMĘCZENIOWEGO

Słowa kluczowe

Zużywanie, wzrost pęknięcia, zmęczenie korozyjne.

Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania mechaniki pękania do matematycznego modelowania skutków zużywania korozyjno-mechanicznego. Referat zawiera wyniki badań eksperymentalnych oraz rezultaty obliczeń symulacyjnych dotyczące propagacji pęknięcia korozyjno-zmęczeniowego próbek zwartych ze stali 0H18N9 poddanych cyklicznemu rozciąganiu w roztworze 3,5% NaCl. Zasadniczym celem prowadzonych prac jest uzyskanie możliwości prognozowania skutków zużycia powierzchni materiału w warunkach, gdy proces niszczący determinowany jest rozwojem mikropęknięcia.

Wprowadzenie

W skojarzeniach ślizgowych pracujących w obecności środowisk elektrolytycznych (powodujących nawodorowanie) istotnym problemem eksploatacyjnym są procesy zużywania determinowane jednoczesnymi oddziaływaniami korozyjnymi i mechanicznymi. Rezultatem prac prowadzonych w poprzednich latach przez autorów artykułu jest program komputerowy umożliwiający pełną symulację przebiegu zużywania korozyjno-mechanicznego powierzchni chropowatych w skojarzeniu pin-on-disc [1–3]. Tworząc algorytm programu przyjęto następujące założenia:

- powierzchnia chropowata metalu modelowana jest układem przylegających do siebie prostopadłościanów; każdy z nich odpowiada pojedynczej mikro nierówności,
- oddziaływania korozyjne i mechaniczne analizowane są w obrębie pojedynczych mikrowystępów nierówności powierzchni,
- mechaniczne oddzielenie fragmentu materiału następuje wskutek kumulacji odkształceń,
- procesy korozyjne przebiegają w obszarach „świeżo odsłoniętych” (ze zmianą energii nawierzchniowej) 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. Za perspektywiczne uznano teorie wynikające z mechaniki pęknięcia materiałów, które zakładają, że niszczenie elementów następuje wskutek propagacji mikroszczeliny wzdłuż granic elementów strukturalnych materiału [4, 5]. W momencie kiedy mikroszczelina osiągnie długość równą krawędzi elementu, następuje jego oderwanie od podłoża i całkowite naruszenie spójności materiału konstrukcyjnego.

Do opisu prędkości propagacji pęknięcia w tych warunkach można wykorzystać model superpozycji, zakładającego liniowe sumowanie skutków elementarnych oddziaływań [4, 5]:

$$\frac{da}{dN_e} = \frac{da}{dN_m} + \frac{da}{dN_{CF}} \quad (1)$$

gdzie: da/dN_e – całkowita prędkość propagacji pęknięcia zmęczeniowego w danym środowisku, da/dN_m – prędkość propagacji pęknięcia „czysto” zmęczeniowego (w środowisku traktowanym jako obojętne), da/dN_{CF} – prędkość propagacji pęknięcia w wyniku synergicznej interakcji obciążenia zmęczeniowego i ataku środowiska w wierzchołku pęknięcia, spowodowanego zmianą sytuacji elektrochemicznej.

1. Koncepcja programu prognozującego prędkość pęknięcia korozyjno-zmęczeniowego

Autorzy artykułu podjęli działania zmierzające do opracowania programu komputerowego, umożliwiającego prognozowanie skutków procesu pęknięcia korozyjno-zmęczeniowego. Tworząc algorytm programu przyjęto następujące założenia:

- analizy obliczeniowe dotyczą drugiego etapu procesu korozyjno-zmęczeniowego niszczenia elementu metalowego – stabilny, podkrytyczny wzrost (propagacja) pęknięcia (dopuszczalny w trakcie eksploatacji),
- zastosowano modele liniowej mechaniki pęknięcia w ujęciu dwuwymiarowym; w liniowej mechanice pęknięcia jedynym parametrem koniecznym do opisu pola naprężeń i przemieszczeń w obszarze dna pęknięcia jest współczynnik intensywności naprężeń (K),
- rzeczywistym parametrem napędzającym rozwój pęknięcia jest zakres zmian współczynnika intensywności naprężeń dla cyklu (ΔK); w zakresie średnich prędkości propagacji pęknięcia (da/dN) – w dwulogarytmicznym układzie współrzędnych – zależność między wspomnianą prędkością a (ΔK) ma charakter liniowy (prawo Parisa) [6].

Zasadniczą częścią struktury algorytmu jest model geometrii elementu ze szczególnym uwzględnieniem mikroszczeliny [7]. Model ten (zbiór punktów odwzorowujących analizowany kontur) stanowi „bazę” do przeprowadzenia analizy obliczeniowej oddziaływań mechanicznych (zmęczeniowych) oraz oddziaływań środowiska (rozpuszczanie anodowe). Oddziaływania mechaniczne i korozyjne mają charakter cykliczny. Analizowane są kolejno po sobie przez oddzielne bloki procedur obliczeniowych. Każde z elementarnych oddziaływań zmienia geometrię elementu (w tym mikroszczeliny) wpływając w ten sposób na dalszy przebieg procesu zużywania. „Dziedziczenie” skutków poprzedniego etapu oddziaływań wykorzystano w algorytmie do uwzględnienia interakcji między zmęczeniem i korozją.

Do wyznaczania pola naprężeń i przemieszczeń w obszarze czoła pęknięcia wykorzystano metodę elementów brzegowych. Metoda ta jest obecnie powszechnie stosowana w mechanice pęknięcia z uwagi na możliwość dokładniejszego określenia pól naprężeń (szczególnie w otoczeniu wierzchołka szczeliny) oraz łatwość modelowania wzrostu szczeliny. W przypadku modelowania wzrostu pęknięcia zaleca się stosować dualną metodę elementów brzegowych. Jest to najbardziej ogólna procedura umożliwiająca analizę za pomocą elementów brzegowych pojedynczych obszarów elementów z pęknięciem. Przy pomocy dualnej metody elementów brzegowych wyznaczane są pola naprężeń i przemieszczeń w analizowanym elemencie. Na podstawie tych danych (zwłaszcza w otoczeniu wierzchołka pęknięcia) dokonywana jest analiza procesu wzrostu szczeliny. Zasadniczy jej etap to rozpatrzenie odpowiedniego kryterium decydującego o możliwości przyrostu szczeliny oraz kierunku jej propagacji. W opracowanym modelu wykorzystano kryterium całki niezmienniczej (J) – preferowane w przypadku szczelin w wierzchołkach trójkątnych karbów [8]. Zgodnie ze wspomnianym kryterium szczelina propaguje w kierunku odpowiadającym maksymalnej wartości całki (J), gdy wielkość ta osiąga pewną wartość krytyczną. Przyrost długości pęknięcia wyznaczany jest na podstawie prawa Parisa dla przyjętego przedziału czasu (liczby cykli zmian obciążenia). Niezbędny do wy-

konania tej oceny zakres zmian współczynnika intensywności naprężeń dla cyklu (ΔK) obliczany jest również na podstawie całki niezmienniczej (J).

Przedstawiony moduł dotyczy propagacji pęknięcia wyłącznie o charakterze zmęczeniowym (wymuszenia mechaniczne). Koncepcja modelowania pęknięcia korozyjno-zmęczeniowego przewiduje opcjonalne wykorzystanie tej części modelu również do prognozowania przyrostu szczeliny w złożonych warunkach wymuszeń. W tym przypadku uwzględnienie oddziaływań korozyjnych polegać będzie na przyjęciu odpowiednich wartości stałych materiałowych (prawo Parisa) uwzględniających wpływ środowiska. Wymaga to oczywiście wcześniejszego przeprowadzenia odpowiednich badań.

Do opisu oddziaływań środowiska wykorzystano w algorytmie programu model anodowego rozpuszczania zaproponowany przez Scully'ego [6]. Zakłada on, że w okresie od pęknięcia warstewki do pełnej repasywacji odsłoniętej powierzchni metalu przez elektrolit w pęknięciu musi przepłynąć pewien minimalny ładunek (Q_{\min}). Przyjmuje się, że przyrost pęknięcia w okresie jednego cyklu zmian obciążenia spowodowany anodowym rozpuszczaniem jest proporcjonalny do ładunku elektrycznego, który przepłynął w tym okresie przez pęknięcie:

$$\frac{da}{dt} = \frac{k_R}{d} Q_f \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon_f} \right) \frac{1}{f} \quad (2)$$

gdzie: k_R – równoważnik elektrochemiczny rozpuszczanego metalu, d – gęstość metalu, Q_f – ładunek elektryczny, który przepływa przez elektrolit w okresie między poszczególnymi aktami pęknięcia warstewki powierzchniowej, ε' – szybkość odkształcenia, ε_f – wartość graniczna odkształcenia, przy której pęka warstewka pasywna, f – częstotliwość zmian obciążenia.

2. Badania i weryfikacja programu

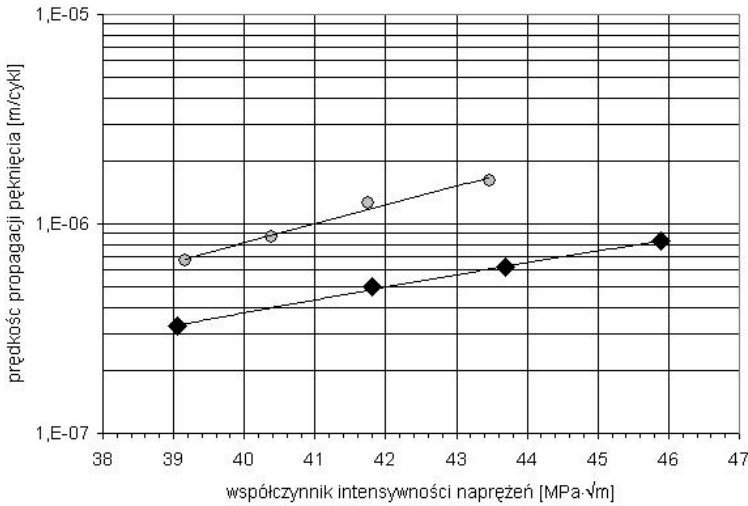
Na potrzeby weryfikacji programu komputerowego prognozującego prędkość propagacji pęknięcia korozyjno-zmęczeniowego wykonano serię badań [9, 10]. Celem eksperymentu było wyznaczenie prędkości propagacji pęknięcia dla próbek zwartych (z karbem) poddanych cyklicznie zmiennemu rozciąganiu. Zastosowano obciążenie stałoamplitudowe, sinusoidalne o współczynniku asymetrii cyklu $R = 0,1$ (maksymalne obciążenie 13 kN). Badania wykonano dla stali 0H18N9 poddanej przesycaaniu w temperaturze 1050°C.

Plan eksperymentu przewidywał wykonanie testów w następujących warunkach:

- w powietrzu przy częstotliwości zmian obciążenia 10 Hz – oszacowanie da/dN_m ,

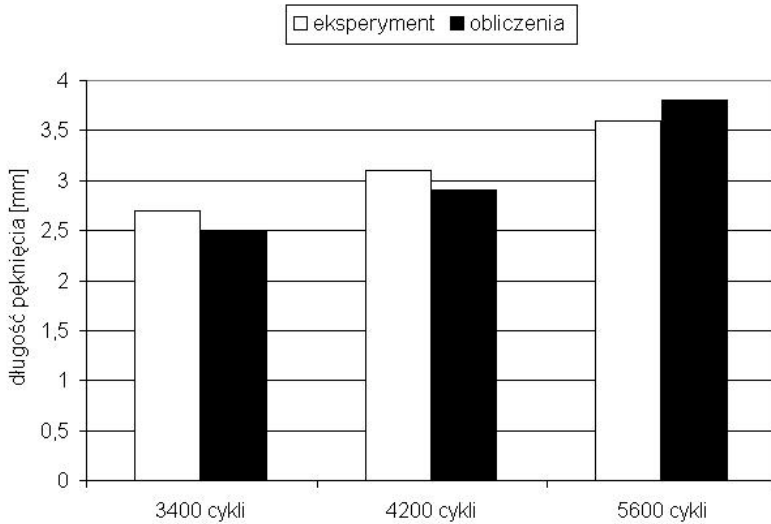
- w roztworze 3,5% NaCl przy częstotliwości zmian obciążenia 0,05 Hz – oszacowanie da/dN_c .

Do rejestracji obrazu w obszarze pęknięcia oraz pomiaru długości pęknięcia wykorzystano system monitorowania pęknięcia produkowany przez ITeE w Radomiu. Po wykonaniu przedpęknięcia (około 1,6 mm) monitorowano przyrost szczeliny wyznaczając prędkość propagacji na podstawie zmian długości przekraczających 0,4 mm. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 1.

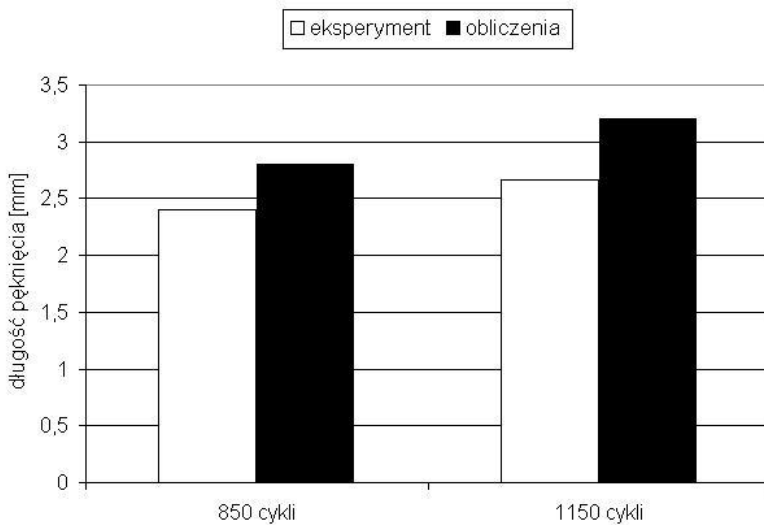


Rys. 1. Wyniki badań (• 3,5% NaCl – 0,05 Hz, ♦ powietrze – 10 Hz)

Kolejne rysunki 2 i 3 zawierają porównanie wyników eksperymentów oraz rezultatów obliczeń (program komputerowy). Do oceny wykorzystano długość pęknięcia wyznaczaną dla różnej liczby cykli zmian obciążenia. W przypadku oddziaływań „czysto” zmęczeniowych maksymalna różnica między wynikami badań i rezultatami obliczeń nie przekracza 10%. Większe rozbieżności (do 20%) pojawiają się w sytuacji, gdy należy uwzględnić wpływ środowiska. Głównym problemem związanym z prognozowaniem propagacji pęknięcia korozyjno-zmęczeniowego jest analityczne oszacowanie zmieniających się w obszarze dna oraz wzdłuż szczeliny warunków elektrochemicznych (potencjał elektryczny, gęstość prądu, stężenie jonów). Wyniki badań wskazują, że uwzględnienie zróżnicowania tychże warunków przyczynia się do zwiększenia precyzji symulacji. W kolejnym etapie prac nad programem przewiduje się wykorzystanie metody elementów brzegowych do wyznaczania zmian potencjału i gęstości prądu wzdłuż krawędzi pęknięcia.



Rys. 2. Porównanie wyników badań i eksperymentu – pękanie „czysto” zmęczeniowe



Rys. 3. Porównanie wyników badań i eksperymentu – pękanie korozyjno-zmęczeniowe

Podsumowanie

Opisany w artykule program komputerowy prognozujący prędkość propagacji pęknięcia korozyjno-zmęczeniowego zostanie wykorzystany do symulowania skutków procesu zużywania skojarzeń ślizgowych pracujących w obecności środowiska elektrolitycznego. W celu adaptacji narzędzia zostaną przepro-

wadzone testy na stanowisku typu pin-on-disk według metodyki opisanej w pracy [12].

Bibliografia

1. Zwierzycki W. (red.): Modele prognostyczne korozyjno-mechanicznego zużywania się elementów maszyn. ITE, Radom – Poznań 2002.
2. Stachowiak A.: New means for calculating sliding pairs corrosive and mechanical wear. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, 2007, vol. 42, s. 44–51.
3. Zwierzycki W., Stachowiak A.: Corrosive and mechanical wear calculation the integrated conception. *Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Materials: 2 Vol./ Special Issue of Journal „Physicochemical Mechanics of Materials”* – No 4. Lviv, 2004, vol. 1, s. 98–101.
4. Cherepanov A.G., Cherepanov G.P.: K teorii ustalostno-korroziionnogo iznašivaniya metallov. *Fiziko-Chimičeskaja Mechanika Materialov*, 1987, nr 1, s. 3–6.
5. Jiang J., Stack M.M., Neville A.: Modelling the tribo-corrosion ineraction in aqueous slipping conditions. *Tribology International*, 2002, vol. 35, s. 669–679.
6. Jakubowski M.: Problemy propagacji pęknięć korozyjno-zmęczeniowych w stalach okrętowych i oceanotechnicznych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2002.
7. Zwierzycki W., Stachowiak A.: Obliczanie zużycia korozyjno-mechanicznego z wykorzystaniem teorii pęknięcia materiałów. *Tribologia*, 2003, nr 5, s. 317–327.
8. Seweryn A.: Metody numeryczne w mechanice pęknięcia. IPPT PAN, Warszawa 2003.
9. PN-87/H-04335 – Metoda badania odporności na pęknięcie w płaskim stanie odkształcenia.
10. PN-84/H-04333 – Metoda badania prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego przy stałej amplitudzie obciążenia.
11. Kawakubo T., Hishida M., Amano K., Katsuta M.: Crack growth behavior of type 304 stainless steel in oxygenated 290°C pure water under low frequency cyclic loading. *Corrosion*, vol. 36, 1980, s. 638–647.
12. Mischler S., Landolt D., Jemmely P.: Wear-accelerated corrosion of passive metal in tribocorrosion systems. *Journal of the Electrochemical Society*, 1998, vol. 145, nr 3, s. 750–758.

Recenzent:
Alexander BALITSKII

The cracking mechanics utilisation of the mathematical modelling of corrosive-abrasive wear effects

Key words

Wear, cracking growth, corrosive fatigue.

Summary

The conception of the cracking mechanics utilisation of the mathematical modelling of corrosive-abrasive wear effects was presented in this article. The paper contains the results of experimental research and simulation calculation concerning a propagation of corrosive-fatigue cracking of specimens made of 0H18N9 steel, putting to the cyclic tension in a 3.5% NaCl solution. The principal objective of this research is to obtain the possibility of the forecasting of material surface wear effects in conditions when the wear process is determined by the micro-cracking evolution.