

Wiesław Zwierzycki, Arkadiusz Stachowiak
Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych
Politechnika Poznańska

ZUŻYWANIA KOROZYJNO-MECHANICZNE. MODEL OBLICZENIOWY PROCESU

Streszczenie

W referacie przeprowadzono analizę stanu wiedzy z zakresu analitycznego modelowania przebiegu zużycia w warunkach oddziaływań korozyjnych i mechanicznych. Zdobyta w ten sposób wiedza pozwoliła na sformułowanie własnego kompleksowego algorytmu obliczeniowego. Na jego podstawie opracowano program komputerowy umożliwiający pełną symulację przebiegu zużycia korozyjno – mechanicznego powierzchni chropowatych w skojarzeniu pin – on – disc. W referacie zamieszczono zestawienie wyników symulacji i rezultatów badań eksperymentalnych.

Słowa kluczowe: zużycie korozyjno – mechaniczne, modele matematyczne

Wprowadzenie

Autorzy referatu podjęli próbę stworzenia narzędzia obliczeniowego wspomagającego projektowanie (w zakresie kształtowania trwałości i niezawodności) elementów węzłów kinematycznych podlegających oddziaływaniom korozyjno-mechanicznym. Zasadniczym etapem realizacji tego zadania było sformułowanie algorytmu pozwalającego oszacować intensywność zużycia w złożonych warunkach wymuszeń. Dlatego rozpoczęto poszukiwania procedur obliczeniowych:

- umożliwiających jednoczesne oszacowanie ubytków materiału spowodowanych obydwojma elementarnymi mechanizmami niszczącymi,
- odzwierciedlających ogólne tendencje przebiegu procesu (wpływ zmian czynników wymuszających na szybkość usuwania materiału),
- umożliwiających przeprowadzenie obliczeń wyłącznie w oparciu o pewne podstawowe dane charakteryzujące konstrukcję i warunki eksploatacji.

Przegląd literatury z zakresu matematycznego modelowania zużywania korozyjno-mechanicznego wskazuje, iż żadna z prezentowanych koncepcji nie spełnia wszystkich założeń kompleksowego algorytmu obliczeniowego. Wynika to przede wszystkim z braku całościowego ujęcia procesu. Większość opracowań koncentruje się wyłącznie na oddziaływaniach korozyjnych w warunkach tarcia. Modele, w których pominięto lub znacząco uproszczono którekolwiek ze zjawisk powodujących usuwanie materiału, nie można uznać za wiarygodne analityczne narzędzie badawcze. Kluczową kwestią dla prawidłowego opisu zużywania w złożonych warunkach wymuszeń jest bowiem uchwycenie interakcji między elementarnymi procesami niszczącymi. Jedynie G.E. Łazarew zaproponował analityczne metody wyznaczania obu składowych zużycia korozyjno-mechanicznego. Jego model, mimo iż zawiera kompleksowy i spójny matematyczny opis procesu, nie posiada uniwersalnego charakteru. Może być stosowany w ograniczonym zakresie. Wykonanie przy jego pomocy obliczeń wymaga bowiem znajomości specyficznych danych (natężenie prądu i chropowatość w obszarze drogi tarcia) charakteryzujących proces zużywania i wykraczających poza zakres informacji, którymi może dysponować konstruktor. Wobec wymienionych ograniczeń współcześnie znanych matematycznych modeli zużywania korozyjno-mechanicznego, autorzy referatu podjęli próbę sformułowania własnego algorytmu obliczeniowego.

Model obliczeniowy

Analiza opracowanych do tej pory modeli analitycznych wyraźnie wskazuje, iż sposób postrzegania elementarnych mechanizmów niszczących (ich fizycznej natury) decyduje o możliwościach obliczeniowych ostatecznej formuły matematycznej. Tylko wzory oparte na spójnej teorii wyjaśniającej istotę zachodzących zjawisk, mogą być wykorzystywane do prognozowania przebiegu zużywania. Autorzy referatu przyjęli następujący model interpretacyjny zużywania korozyjno-mechanicznego. W czasie gdy elementy węzła pozostają w spoczynku ich powierzchnia może pokrywać się warstwą pasywnych tlenków. Z chwilą rozpoczęcia ruchu, wskutek względnych przemieszczeń, następuje usuwanie produktów korozji i odsłanianie fizycznie czystej powierzchni metalu. Następnie w obszarze rzeczywistego styku zachodzi odkształcenie powierzchni prowadzące do usunięcia fragmentu materiału podłoża. Na świeżo odsłoniętej powierzchni rozpoczynają się procesy elektrochemiczne (początkowo roztwarzanie anodowe później ponowna pasywacja). Następuje utlenianie materiału podłoża prowadzące do utworzenia nowej warstwy pasywnych tlenków.

Szkielet sformułowanego przez autorów referatu algorytmu obliczeniowego stanowi model zaproponowany przez G.E. Łazarewa. Jako uzupełnienie wprowadzono moduły pozyskiwania danych adekwatnych do rzeczywistych warunków eksploatacji. Przede wszystkim opracowano:

- moduł generowania przebiegu prądu korozyjnego – jego podstawę stanowi model wzrostu warstw pasywnych opisany w pracy [Jemmely 2000],
- moduł symulujący zmiany chropowatości powierzchni – precyzyjna lokalizacja oddziaływań (wskazanie konkretnych mikronierówności) powinna umożliwić prognozowanie zmian mikrogeometrii powierzchni w powiązaniu z ogólnym modelem zużywania korozyjno-mechanicznego (proponycja własna autorów referatu).

Utworzenie algorytmu obliczeniowego polegało na połączeniu wymienionych wyżej procedur w spójną strukturę. Koncepcję algorytmu oparto na 3 założeniach:

- oddziaływania mechaniczne i korozyjne mają charakter cykliczny – każde z oddziaływań analizowane jest przez osobny blok procedur obliczeniowych w kolejności zgodnej z przyjętym modelem interpretacyjnym,
- każde z elementarnych oddziaływań zmienia stan powierzchni materiału wpływając w ten sposób na dalszy przebieg procesu zużywania – „dziedziczenie” skutków poprzedniego etapu oddziaływań wykorzystano w algorytmie do uwzględnienia interakcji między tarciami i korozją,
- ubytki materiału spowodowane elementarnymi procesami niszczącymi wyznaczone są na podstawie danych adekwatnych do rzeczywistych warunków eksploatacji – w bloku obliczeniowym każdego z oddziaływań znajduje się analityczny moduł pozyskiwania danych.

Szybkość zużywania mechanicznego obliczana jest na podstawie modelu zmęczeniowego odniesionego do styku mikronierówności powierzchni. Opisany przez ten model mechanizm niszczenia powierzchni zakłada oderwanie fragmentów deformowanych mikrowystępów po określonej liczbie oddziaływań stykowych (ściskanie i powrót do pierwotnego wymiaru). Takie ujęcie zjawisk mechanicznych ułatwia rozpoczęcie analizy procesów elektrochemicznych. Znane są bowiem rozmiary obszaru rzeczywistego styku oraz istnieje możliwość określenia momentu odsłonięcia „świeżej” powierzchni. Wiadomo zatem, kiedy rozpocznie się pasywacja i na jak dużej powierzchni będzie przebiegać. W omawianym algorytmie do oszacowania intensywności usuwania materiału wskutek oddziaływań korozyjnych zastosowano równanie Faradaya. Metodę taką wykorzystuje większość badaczy. Specyfika rozwiązania zaproponowanego przez autorów referatu polega na tym, iż niezbędna do przeprowadzenia owych obliczeń wartość prądu wyznaczana jest w sposób analityczny. W algorytmie umieszczono moduł generujący zmiany

natężenia prądu na świeżo odsłoniętej powierzchni od momentu aktywacji do pełnej ponownej pasywacji. Takie rozwiązanie umożliwia otrzymanie charakterystyk elektrochemicznych adekwatnych do rzeczywistych warunków eksploatacji bez konieczności przeprowadzania eksperymentów. Interakcje między obu elementarnymi mechanizmami niszczącymi uwzględniono w sposób następujący:

- zużycie korozyjne wyznaczone jest tylko w tych obszarach, w których wcześniej nastąpiło oddzielenie materiału wskutek odkształceń mechanicznych (wpływ oddziaływań mechanicznych na przebieg procesów korozyjnych),
- po każdym cyklu oddziaływań zmienia się topografia powierzchni obszaru styku; istotną rolę odgrywa tutaj zużycie korozyjne stanowiące ponad połowę całkowitego ubytku materiału; zmiana chropowatości powierzchni wpłynie na częstotliwość i wartość odkształceń mechanicznych (wpływ korozji na przebieg procesów mechanicznych).

Całkowite zużycie korozyjno-mechaniczne wyznaczone jest jako algebraiczna suma obu składowych.

Wobec problemów związanych z opisem oddziaływań stykowych w oparciu o uśrednione charakterystyki chropowatości zaproponowano wykorzystanie numerycznego modelu mikrogeometrii analizowanego obszaru. Na potrzeby procedury obliczeniowej przyjęto, iż chropowata powierzchnia może być reprezentowana przez ortogonalny układ przylegających do siebie prostopadłościanów. Każdy prostopadłościan odpowiada pojedynczej mikronierówności. Wysokości wszystkich mikrowystępów generowane są w sposób losowy według przyjętego typu rozkładu (udziału nośnego profilu).

W celu prognozowania zmian eksploatacyjnych powierzchni chropowatej postanowiono analizować oddziaływania korozyjne i mechaniczne w obszarze pojedynczych mikrowystępów. Działania te obejmują:

- a) zlokalizowanie mikrowystępów w obrębie których dojdzie do bezpośredniego styku współpracujących elementów; program każdorazowo wyznacza minimalne zbliżenie obu powierzchni zapewniające wzajemny styk takiej liczby występów, aby naprężenia rzeczywiste były równe mikrotwardości materiału
- b) wyznaczenie ubytku materiału spowodowanego procesami korozyjnymi i mechanicznymi zachodzącymi na powierzchni mikrowystępów wyselekcjonowanych w punkcie „a”,
- c) skorygowanie wysokości mikronierówności stosownie do obliczonej całkowitej wartości zużycia.

Weryfikacja

Opisany algorytm posłużył autorom referatu do opracowania programu komputerowego. Jego rezultaty zweryfikowano w oparciu o wyniki eksperymentów przeprowadzonych przez zespół P. Jemmely'ego [Jemmely 1999]. Podczas tych badań wykorzystywano stanowisko modelowe typu pin-on-disc, na którym nieodkształcalny, płasko zakończony trzpień ślizgał się ruchem posuwisto-zwrotnym po powierzchni prostopadłościennej próbki wykonanej ze stali 430. Oba współpracujące elementy zanurzone były w roztworze kwasu siarkowego. Częstotliwość ruchu wynosiła 5 Hz. W każdym kierunku trzpień przemieszczał się o około 2,5 mm. Czynność ta zajmowała 0,075 s. Po przejściu w kolejne skrajne położenie trzpień pozostawał w spoczynku przez 0,025 s. Dane weryfikacyjne wybrano z uwagi na ich następujące cechy:

- a) kompleksowy charakter badań – określono wpływ najistotniejszych wymuszeń (potencjału, naprężeń i rodzaju elektrolitu) na wartość zużycia,
- b) zastosowanie w badaniach uproszczonego fizycznego modelu procesu - trzpień nie ulegał zużyciu.

Za pomocą programu komputerowego wykonano symulacje zużywania korozyjno-mechanicznego w warunkach podobnych do występujących podczas rzeczywistych eksperymentów. Dokonując weryfikacji brano pod uwagę:

- wartość intensywności zużywania całkowitego, mechanicznego i korozyjnego,
- wpływ zmian potencjału i naprężeń na przebieg procesu zużycia.

W tabeli 1 zestawiono rezultaty symulacji komputerowych oraz badań eksperymentalnych. Wyniki obliczeń odpowiadają stanowi układu po 160 pełnych ruchach trzpienia (około 8 sekund pracy węzła w warunkach rzeczywistych). Podczas badań eksperymentalnych w okresie takim następowała stabilizacja procesu zużycia.

Tabela 1. Porównanie zużycia wyznaczonego eksperymentalnie oraz przy pomocy programu

Table 1. Comparison of wear determined experimentally and with software

naprężenia normalne [MPa]	stosowany potencjał [V (MSE)]	przedział wyników pomiarów [nm/cykl]	średnia wartość dla serii pomiarów [nm/cykl]	wyniki symulacji [nm/cykl]	różnica (względem wartości średniej dla serii pomiarów) [%]
zużycie całkowite					
45	-0,5	1,80 – 2,45	2,05	1,85	9,8
	0,5	0,8 – 1,85	1,15	1,05	8,7
8	-0,5	0,8	0,8	0,8	0
	0,5	0,3 – 0,5	0,4	0,45	12,5
zużycie korozyjne					
45	-0,5	0,8 – 1,4	1,15	1,15	0
	0,5	0,6 – 1,2	0,8	0,7	12,5
8	-0,5	0,35 – 0,65	0,45	0,6	33,3
	0,5	0,20 – 0,30	0,25	0,30	40,0
zużycie mechaniczne					
45	-0,5	0,5 – 1,2	0,9	0,55	38,8
	0,5	0,15 – 0,75	0,35	0,4	14,3
8	-0,5	0,20 – 0,50	0,40	0,20	50
	0,5	0 – 0,15	0,05	0,10	50

Wnioski

Prezentowane zestawienia pozwalają sformułować następujące wnioski:

1. wszystkie wyniki obliczeń mieszczą się wewnątrz przedziału wyznaczonego przez skrajne rezultaty otrzymane podczas eksperymentów,
2. największą zgodność wyników symulacji i danych eksperymentalnych uzyskano dla zużycia całkowitego, maksymalne rozbieżności nie przekraczają 13% wartości średniej dla serii pomiarowej; przy obecnym stanie wiedzy o zużywaniu korozyjno – mechanicznym zbieżność taką należy uznać za zadowalającą; jest to rezultat lepszy, niż w przypadku modelu G.E. Lazareva (15%), który wykorzystano jako szkielet własnego algorytmu obliczeniowego,
3. w analizowanym zakresie wyniki programu właściwie odzwierciedlają wpływ naprężeń i stosowanego potencjału na intensywność zużywania korozyjno – mechanicznego; podkreślić należy, iż zastosowanie w programie modułu symulującego zmiany chropowatości powierzchni pozwoliło uwzględnić (stwierdzony eksperymentalnie w pracy [Jemmely 1999]) wpływ potencjału na intensywność zużywania mechanicznego.

Bibliografia

Lazarev G.E. 1987. Osnovnye zakonomernosti iznašivanija korrozionnostojkich stalej i splavav pri trenii w elektrolitach. *Trenie i Iznos*, nr 2, s. 223-230.

Jemmely P., Mischler S. 2000. Landolt D.: Electrochemical modeling of passivation phenomena in tribocorrosion. *Wear*, vol. 237, nr 237, s. 63-76.

Jemmely P., Mischler S., Landolt D. 1999. Tribocorrosion behavior of Fe-17Cr stainless steel in acid and alkaline solutions. *Trib. International*, vol. 32, s. 295-303.

CORROSIVE-CUM-MECHANICAL WEAR. PROCES CALCULATION MODEL

Summary

The study analyses state of the art on analytical modelling of the course of wear in conditions of corrosive and mechanical reactions. The obtained knowledge allowed to form own complex calculation algorithm. On its basis software for full simulation of corrosive-cum-mechanical wear of uneven surfaces in combination pin-on- disc was developed. The study presents results of simulations and results of experimental studies.

Key words: Key words: corrosive-cum-mechanical wear, mathematical models