

Arkadiusz STACHOWIAK*, Wiesław ZWIERZYCKI*

UOGÓLNIONY MODEL ZUŻYWANIA TRIBOKOROZYJNEGO

A GENERALIZED MODEL OF WEAR TRIBOCORROSION

Słowa kluczowe:

tribokorozyja, model obliczeniowy, węzeł pin-on-plate

Key words:

tribocorrosion, calculation model, model pair type pin-on-plate

Streszczenie

W artykule podjęto próbę aproksymowania wyników badań zużywania tribokorozyjnego stali odpornych na korozję AISI 304 i AISI 420 w 0,5 M roztworze H_2SO_4 . Testy wykonano na specjalistycznym stanowisku z węzłem modelowym typu pin-on-plate. W poszczególnych seriach różnicowano nacisk w strefie styku (p) i częstotliwość ruchu przeciwpróbkki (f). Do aproksymacji wykorzystano model zużywania w postaci ogólnej: $I_h = Kp^x$ (I_h – liniowa intensywność zużycia, K , x – stałe materiałowe). Uzyskano zadowalające rezultaty aproksymacji (współczynnik korelacji powyżej 0,85). Jednocześnie stwierdzono, że skuteczność zastosowanego modelu maleje ze wzrostem tempa oddziaływań korozyjnych.

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska, e-mail: wieslaw.zwierzycki@put.poznan.pl, tel. (61) 665-26-55, fax (61) 665-28-55, e-mail: arkadiusz.stachowiak@put.poznan.pl.

WPROWADZENIE

Tribokorozja to złożony proces zużywania determinowany jednoczesnym działaniem tarcia oraz środowiska korozyjnego [L. 1]. Procesy mechaniczne i elektrochemiczne wzajemnie na siebie oddziałują, a składowa interakcyjna może stanowić zasadniczą część całkowitego zużycia. Efekt interakcji oddziaływań mechanicznych i korozyjnych jest najbardziej znaczący dla stali wykazujących zdolność do pasywacji.

We wcześniejszych pracach [L. 2, 3] autorzy artykułu sformułowali model tribokorozji, który pozwala prognozować przebieg procesu (zasadniczo jego skutki) adekwatnie do warunków realizacji testu badawczego (stosowanych wymuszeń eksploatacyjnych). Opracowane narzędzie umożliwia wykonanie analiz obliczeniowych dla modelowego węzła ślizgowego typu pin-on-plate z ruchem posuwisto-zwrotnym płasko zakończonych trzpienia. Skuteczność autorskiego modelu zweryfikowano, porównując wyniki obliczeń i rezultaty badań [L. 2, 3]. Stwierdzono, że maksymalne różnice nie przekraczają 10%. Zadawalająca skuteczność modelu wynika z zastosowania odpowiednich formuł matematycznych opisujących istotę elementarnych oddziaływań zużyciowych (mikroskawanie, zmęczenie stykowe, roztwarzanie anodowe, pasywacja) w obrębie rzeczywistej strefy stuku węzła ślizgowego.

W niniejszym artykule podjęto próbę uzyskania modelu prognostycznego poprzez aproksymację wyników badań. Do aproksymacji wykorzystano ogólny model zużywania [L. 4–7], w którym liniowa intensywność zużywania (I_h) jest funkcją potęgową nacisków w strefie styku (p):

$$I_h = \frac{h}{l} = K \cdot p^x \quad (1)$$

gdzie: I_h – liniowa intensywność zużywania, tzn. liniowe zużycie (h) przypadające na jednostkę drogi tarcia (l),

K, x – stałe materiałowe.

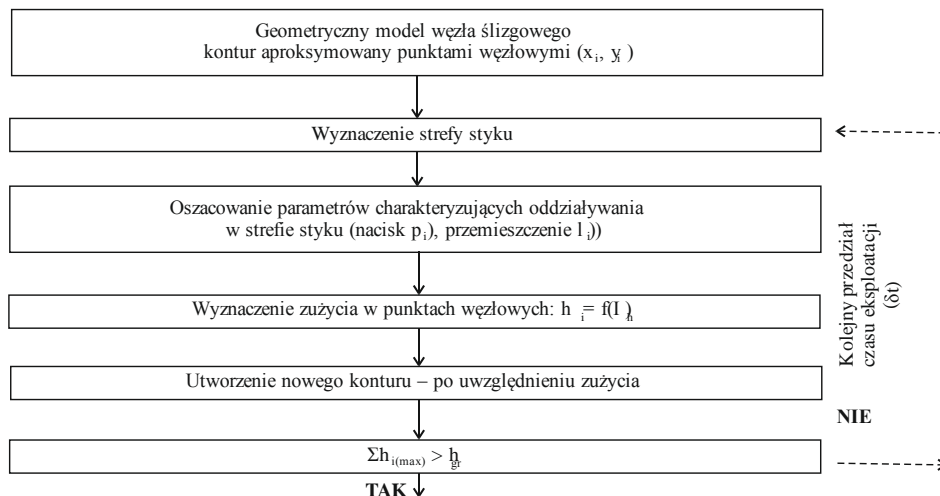
Taki model zużywania autorzy artykułu zastosowali już wcześniej, opracowując narzędzia obliczeniowe w zakresie oceny trwałości rzeczywistych węzłów maszyn. Obszerny opis opracowanych wówczas programów komputerowych zamieszczono w pracy [L. 7]. Umożliwiają one oszacowanie czasu pracy do osiągnięcia zużycia granicznego (h_{gr}) dla łożysk ślizgowych, mechanizmu krzywkowego i przekładni zębatej.

Zastosowane we wspomnianych programach algorytmy symulacyjne dotyczyły zużywania wyłącznie mechanicznego. Jako główny czynnik determinujący ten rodzaj „niszczenia” powierzchni materiału uznano wartość nacisku w obszarze styku współpracujących elementów. Również w przypadku tribokorozji przy relatywnie dużych naciskach nominalnych (13–45 MPa) czynnikiem

inicjującym zużyciu są oddziaływania tarciove w obszarze rzeczywistego styku [L. 2, 3, 8]. To one dopiero mogą doprowadzić do usunięcia warstwy pasywnych tlenków i zapoczątkowania intensywnych reakcji elektrochemicznych (roztwarzanie anodowe, pasywacja).

Na Rys. 1 scharakteryzowano algorytm prognozowania trwałości węzłów ślizgowych zastosowany we wcześniejszych pracach [L. 7] autorów niniejszego artykułu. Zmianę kształtu współpracujących elementów następującą w wyniku zużycia na potrzeby algorytmu obliczeniowego potraktowano jako proces dyskretny przebiegający w punktach węzłowych. Każdy następny (w czasie) stan elementu różni się od poprzedniego o wartość zużycia powstałą w relatywnie małym przedziale czasu eksploatacji (δt). W ten sposób ciągły proces zużycia zastąpiono dyskretnym modelem obliczeniowym. Wektor zużycia skierowany jest normalnie do powierzchni styku.

Ogólnej formule – wyrażonej wzorem (1) – podlegają szczegółowe modele zmęczenia stykowego sprężystego przy układzie niedotartym i przy styku plastycznym (teoria I.W. Kragielskiego), proces zużycia kontaktowo-ściernego (model G.J. Jampolskiego). Wiele innych modeli również daje się zredukować do postaci $I_h = Kp^x$ [L. 7]. Dlatego też autorzy niniejszego artykułu postanowili sprawdzić skuteczność takiej metody aproksymacji dla tribokorozji.



Rys. 1. Algorytm prognozowania zużycia

Fig. 1. Wear prognosis algorithm

STANOWISKO I WYNIKI BADAŃ TRIBOKOROZJI

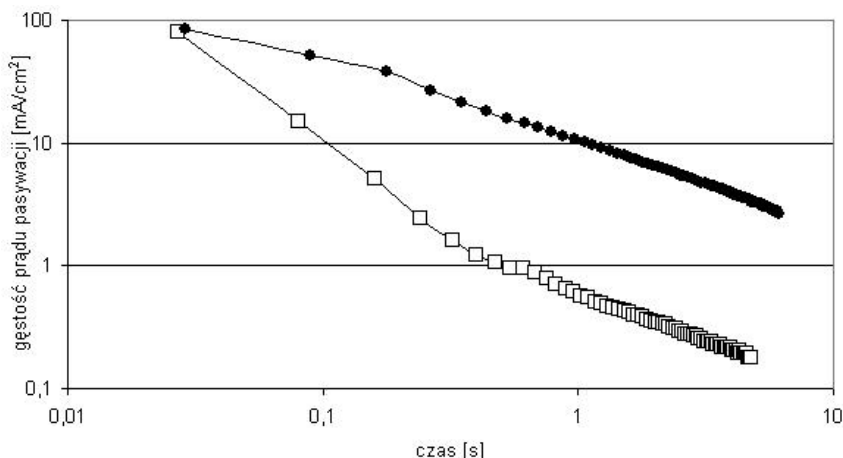
Zamieszczone w artykule wyniki badań procesu tribokorozji uzyskano, wykorzystując specjalistyczne stanowisko z węzłem modelowym typu pin-on-plate.

Stanowisko zaprojektowano i wykonano w Politechnice Poznańskiej [L. 2, 3]. Jako przeciwpróbkę zastosowano trzpień wykonany z węgla spiekane w kształcie ściętego stożka o średnicy płaskiego końca 0,5 mm. Trzpień przemieszczał się ruchem posuwisto-zwrotnym po powierzchni próbki na dystansie około 6 mm. Do monitorowania zjawisk elektrochemicznych wykorzystano układ trójelektrodowy z potencjostatem ATLAS 9833. W trakcie testów jako elektrodę odniesienia wykorzystano elektrodę kalomelową (SCE). Oceny zużycia powierzchni próbek dokonywano po zakończeniu testu. Jako miarę zużycia przyjęto głębokość śladu zużycia (h) wyznaczaną na podstawie pomiarów profilometrycznych w połowie długości drogi tarcia. Dla poszczególnych grup wymuszeń wykonano po 3 testy.

W Tabelach 1 i 2 przedstawiono wyniki badań intensywności tribokorozji stali AISI 304 oraz AISI 420 w 0,5 M roztworze H_2SO_4 w warunkach polaryzacji potencjałem 100 mV(SCE) (początek zakresu pasywnego).

W poszczególnych testach różnicowano nacisk w strefie styku (13–49 MPa) i częstotliwość ruchu trzpienia (2–5 Hz). Pierwszy parametr miał zmieniać intensywność oddziaływań tarciovych w procesie tribokorozji, drugi intensywność oddziaływań elektrochemicznych.

Dodatkowo na Rys. 2 przedstawiono przebiegi prądu repasywacji dla badanych stali w 0,5 M roztworze H_2SO_4 przy potencjale polaryzacji 100 mV(SCE). Ilustrują one tempo odbudowy warstw pasywnych i pozwalają oszacować podatność na zużycie elektrochemiczne w warunkach tribokorozji. W przypadku stali martenzytycznej AISI 420 proces pasywacji przebiega wolniej i przy wyraźnie wyższych wartościach gęstości prądu.



Rys. 2. Prąd pasywacji badanych stali (□ – AISI 304, ● – AISI 420)

Fig. 2. Passivation current for various steels (□ – AISI 304, ● – AISI 420)

Tabela 1. Wyniki badań tribokorozji (AISI 304, 0,5 M H₂SO₄, 100 mV(SCE))Table 1. Results of experiments of tribocorrosion (AISI 304, 0.5 M H₂SO₄, 100 mV(SCE))

| Nacisk | Częstotliwość ruchu trzpienia (f) | Prędkość ślizgania (v _s) | Liniowa intensywność zużywania (i _h) |
|--------|-----------------------------------|--------------------------------------|--|
| [MPa] | [Hz] | [m/s] | [m/m] |
| 13,45 | 5 | 0,060 | 8,67E-08 |
| 25,12 | | | 1,43E-07 |
| 37,10 | | | 1,82E-07 |
| 49,12 | | | 2,68E-07 |
| 13,45 | 4 | 0,048 | 8,77E-08 |
| 25,12 | | | 1,47E-07 |
| 37,10 | | | 1,87E-07 |
| 49,12 | | | 2,74E-07 |
| 13,45 | 3 | 0,036 | 8,94E-08 |
| 25,12 | | | 1,51E-07 |
| 37,10 | | | 1,93E-07 |
| 49,12 | | | 2,79E-07 |
| 13,45 | 2 | 0,024 | 9,32E-08 |
| 25,12 | | | 1,54E-07 |
| 37,10 | | | 2,02E-07 |
| 49,12 | | | 2,89E-07 |

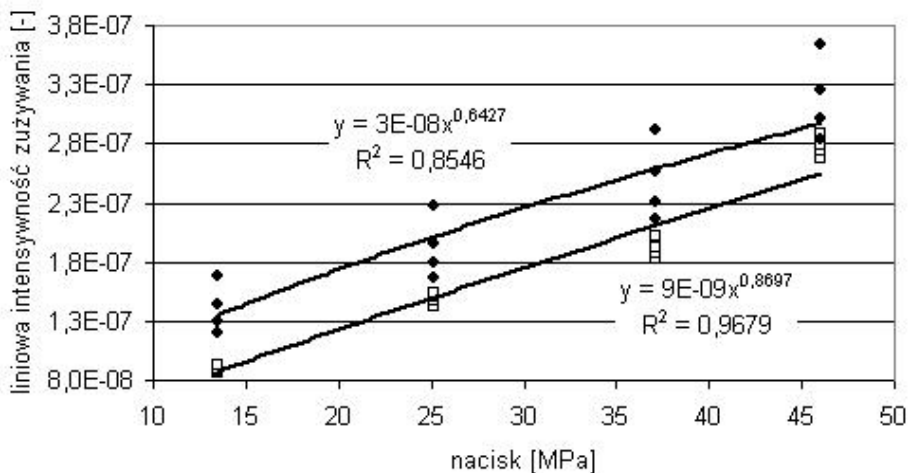
Tabela 2. Wyniki badań tribokorozji (AISI 420, 0,5 M H₂SO₄, 100 mV(SCE))Table 2. Results of experiments of tribocorrosion (AISI 420, 0.5 M H₂SO₄, 100 mV(SCE))

| Nacisk | Częstotliwość ruchu trzpienia (f) | Prędkość ślizgania (v _s) | Liniowa intensywność zużywania (I _h) |
|--------|-----------------------------------|--------------------------------------|--|
| [MPa] | [Hz] | [m/s] | [m/m] |
| 13,45 | 5 | 0,060 | 1,2E-07 |
| 25,12 | | | 1,67E-07 |
| 37,10 | | | 2,17E-07 |
| 49,12 | | | 2,83E-07 |
| 13,45 | 4 | 0,048 | 1,3E-07 |
| 25,12 | | | 1,79E-07 |
| 37,10 | | | 2,31E-07 |
| 49,12 | | | 3,02E-07 |
| 13,45 | 3 | 0,036 | 1,44E-07 |
| 25,12 | | | 1,96E-07 |
| 37,10 | | | 2,56E-07 |
| 49,12 | | | 3,26E-07 |
| 13,45 | 2 | 0,024 | 1,69E-07 |
| 25,12 | | | 2,28E-07 |
| 37,10 | | | 2,91E-07 |
| 49,12 | | | 3,64E-07 |

APROKSYMACJA WYNIKÓW BADAŃ

Autorzy artykułu podjęli próbę aproksymowania danych eksperymentalnych dotyczących intensywności zużycia tribokorozyjnego (**Tabele 1 i 2**) za pomocą ogólnego modelu w postaci zależności potęgowej. Wyniki przedstawiono na **Rys. 3**. W przypadku obu analizowanych stali stwierdzono dość wysoki współczynnik korelacji ($R^2 > 0,85$) dla zastosowanej metody aproksymacji. Można zatem uznać, że zastosowany model zużycia w postaci ogólnej ($I_h = Kp^n$) pozwala dobrze prognozować intensywność ubytku materiału podczas tribokorozji w analizowanym zakresie wymuszeń. Należy podkreślić, że w przypadku obu stali aproksymacją objęto dane opisujące proces zużycia inicjowany mikroskrawaniem [**L. 8**].

Maksymalne różnice między wynikami aproksymacji a rezultatami badań w analizowanym zakresie wymuszeń nie przekraczają 12% dla stali AISI 304 oraz 28% dla stali AISI 420. W przypadku analiz inżynierskich nie są to zbyt duże rozbieżności. Należy jednak zauważyć, że skuteczność zastosowanego modelu maleje ze wzrostem intensywności oddziaływań korozyjnych. Dla stali AISI 420 składowa elektrochemiczna zużycia tribokorozyjnego stanowi ponad 80–90% (dla stali AISI 304 tylko 60–75%).



Rys. 3. Zależność między liniową intensywnością zużycia tribokorozyjnego i naciskiem (□ – AISI 304, ● – AISI 420)

Fig. 3. The relationship between the linear wear intensity of tribocorrosion and pressure (□ – AISI 304, ● – AISI 420)

W eksperymentach badawczych jako czynnik wymuszający stosowano również częstotliwość ruchu trzpienia (f) (prędkość ślizgania $v_s = 2sf$, gdzie: s – przemieszczenie trzpienia). Parametru tego nie uwzględniono w zastosowanym modelu aproksymacji. W celu zbadania poziomu zależności liniowej między

dzy intensywnością zużywania (I_h) i prędkością ślizgania (v_s) dla obu stali (**Tabele 1 i 2**) wyznaczono współczynnik korelacji Pearsona. Obliczenia wykonano, wykorzystując odpowiednie funkcje pakietu Excel. Oszacowane wartości współczynników kształtowały się na poziomie: $-0,08$ dla stali AISI 304 oraz $-0,38$ dla stali AISI 420. Uzyskane wartości rozpatrywane na poziomie istotności 5% nie wskazują na silną korelację między intensywnością zużywania (I_h) i prędkością ślizgania (v_s). Można zatem stwierdzić, że zastosowany model aproksymacji z naciskiem jako jedyną zmienną jest odpowiedni do prognozowania intensywności zużywania tribokorozyjnego w analizowanych warunkach.

Ujemna wartość współczynnika korelacji Pearsona wskazuje, że wzrostowi prędkości ślizgania (v_s) przeciwpróbki w skojarzeniu pin-on-plate odpowiada obniżenie liniowej intensywności zużywania (I_h). Wynika to z faktu, że przy niższej prędkości ruchu trzpienia przez dłuższy czas powierzchnia próbki (w obszarze drogi tarcia) wystawiona jest na działanie środowiska korozyjnego.

Większa bezwzględna wartość współczynnika korelacji Pearsona dla stali AISI 420 spowodowana jest wolniejszą repasywacją (**Rys. 2**). Mniejsze tempo odbudowy warstw pasywnych i jednocześnie wyższa gęstość prądu towarzysząca temu procesowi skutkuje większym ubytkiem korozyjnym materiału próbki. Efekt potęguje wydłużony czas ekspozycji powierzchni próbki w obszarze drogi tarcia.

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki aproksymacji rezultatów badań zużywania tribokorozyjnego stali AISI 304 i AISI 420 w 0,5 M roztworze H_2SO_4 w warunkach polaryzacji potencjałem z zakresu pasywacji. Wysoki współczynnik korelacji dla zastosowanego modelu aproksymacji pozwala stwierdzić, że w analizowanym zakresie wymuszeń można zastosować ogólny model zużywania (zależność potęgowa $I_h = Kp^x$) do opisu intensywności ubytku materiału w warunkach tribokorozyjii. Istnieje zatem możliwość wykorzystania opracowanych wcześniej przez autorów artykułu narzędzi prognozujących trwałość wybranych węzłów ślizgowych także do realizacji obliczeń w warunkach tribokorozyjii. Model zużywania w postaci ogólnej umożliwi prognozowanie trwałości węzłów ślizgowych z wykorzystaniem metody różnic skończonych. Wyniki takiej analizy mogą wspomagać decyzje konstruktorów związane z wyborem materiału na węzły ślizgowe pracujące w warunkach tribokorozyjii.

Stwierdzony spadek skuteczności modelu aproksymacji ze wzrostem intensywności oddziaływań elektrochemicznych wskazuje, że w przypadku złożonego procesu tribokorozyjii stosowanie ogólnego modelu zużywania stanowić może, w pewnych sytuacjach, dość duże uproszczenie. Prosty model aproksymacyjny nie uwzględnia bowiem szeregu interakcji między tarcieniem i korozją, wynikających między innymi z geometrii węzła. Dlatego też w przypadku elemen-

tarnych badań procesu tribokorozji bardziej przydatny jest autorski model symulacyjny opisany w pracach [L. 2, 3].

LITERATURA

1. Jiang J., Stack M.M., Neville A.: Modelling the tribo-corrosion interaction in aqueous slipping conditions. *Tribology International*, 2002, vol. 35, pp. 669–679.
2. Stachowiak A., Zwierzycki W.: Verification of computational model for corrosive and mechanical wear. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2009, vol. 44, nr 4, pp. 28–36.
3. Stachowiak A., Zwierzycki W.: Tribocorrosion modeling of stainless steel in a sliding pair of pin-on-plate type. *Tribology International*, 2011, vol. 44, pp. 1216–1224.
4. Kragielski I.V.: *Trenie i iznos*. Masinstroenie, Moskwa 1988.
5. Grib V.V.: *Resenie tribotechniceskich zadac cislennymi metodami*. Nauka, Moskwa 1982.
6. Lubas J.: Practical application of boron-modified sliding pairs in IC engine. *Tribology International*, 2010, vol. 43, pp. 2046–2050.
7. Fizyczne podstawy doboru materiałów na elementy maszyn współpracujące tarcio-wo. Pod red. W. Zwierzyckiego i M. Grądkowskiego, Wydawnictwo ITeE, seria: Biblioteka Problemów Eksploatacji, Radom 2000.
8. Stachowiak A., Zwierzycki W.: Analysis of the tribocorrosion mechanisms in a pin-on-plate combination on the example of AISI304 steel. *Wear*, 2012, vol. 294, pp. 277–285.

Summary

The article attempts to approximate the results of studies of tribocorrosion wear of stainless steel AISI 304 and AISI 420 in 0.5 M H₂SO₄ solution. The tests were performed in a specialized position of the node model pin-on-plate. In particular, a series of differentiated pressures in the contact zone (p) and the frequency of counter-specimen movement (f) were used. The approximation model was used for wear in the general form: $I_h = Kp^x$ (I_h – linear wear intensity, K, x – solid materials). Approximation obtained satisfactory results (correlation coefficient of 0.85 above). At the same time, it was found that the effectiveness of the applied model decreases with an increase in the rate of corrosion effects.