

Arkadiusz STACHOWIAK*, Wiesław ZWIERZYCKI**

ZUŻYCIE DELAMINACYJNE STALI AISI 304 W WARUNKACH TRIBOKOROZJI

DELAMINATION WEAR OF STEEL AISI 304 IN TRIBOCORROSIVE CONDITIONS

Słowa kluczowe:

tribokorozja, zużycie delaminacyjne

Key words:

tribocorrosion, delamination wear

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań zużywania korozyjno-mechanicznego (tribokorozji) stali AISI 304 w 3,5% roztworze NaCl. Badania wykonano na specjalistycznym stanowisku z węzłem modelowym typu pin-on-disc, zaprojektowanym i wykonanym w Instytucie Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej. Po testach

* Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. (61) 6652655, fax. (61) 6652855, e-mail: arkadiusz.stachowiak@put.poznan.pl.

** Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, email: wieslaw.zwierzycki@put.poznan.pl.

przy obciążeniu rzędu 0,36 MPa i średniej prędkości ślizgania 60 mm/s, na powierzchni tarcia zaobserwowano ślady charakterystyczne dla zużycia delaminacyjnego. Wyniki badań zilustrowano zdjęciami mikroskopowymi powierzchni zużycia oraz zglądu wykonanego wzdłuż drogi tarcia. Dodatkowo zamieszczono rezultaty symulacji numerycznych (rozkład naprężeń i współczynnika intensywności naprężeń w strefie styku) potwierdzające możliwość propagacji pęknięcia (zainicjowanego w miejscach nieciągłości) równoległe do powierzchni tarcia

WPROWADZENIE

W przypadku skojarzenia pin-on-disc przy tarciiu ślizgowym w środowisku korozyjnym zużywanie (tribokorozja) następuje najczęściej wskutek korozji równomiernej na powierzchniach uprzednio odsłoniętych w wyniku:

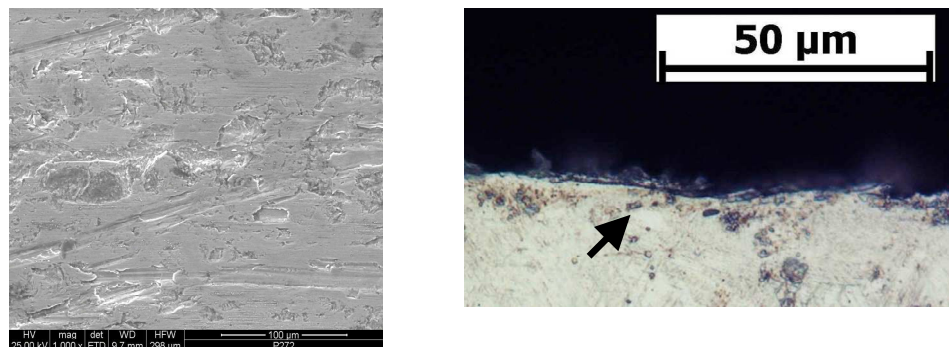
- mikroskrawania powierzchni próbki przez występy chropowatości twardszej przeciwpróbki [L. 1, 2]; proces charakterystyczny dla dużych nacisków jednostkowych,
- zmęczenia cyklicznie deformowanych występow chropowatości próbki prowadzącego do zainicjowania i propagacji pęknięcia w głąb materiału [L. 3–6]; proces charakterystyczny dla małych nacisków jednostkowych.

Jednym z przypadków zużycia w wyniku propagacji pęknięcia może być również zużywanie delaminacyjne [L. 6, 7]. W węzle ślizgowym każdy punkt styku na powierzchni bardziej miękkiego ciała (próbki) podlega cyklicznym obciążeniom przekazywanym przez występy chropowatości twardszego ciała (przeciwpróbki) [L. 8]. Następstwem tych oddziaływań jest kumulacja odkształceń plastycznych i naprężeń w warstwie przypowierzchniowej ciała bardziej miękkiego. Efektem kumulacji odkształceń są pęknięcia w warstwie podpowierzchniowej. Tak powstające szczeliny oraz już wcześniej istniejące w materiale nieciągłości mogą propagować przy dalszym cyklicznym obciążaniu obszaru styku i jego odkształcaniu. Kierunek wzrostu tych pęknięć jest równoległy do powierzchni tarcia. Jeśli zaistnieją sprzyjające warunki (osłabienie odkształcanej warstwy), pęknięcie wychodzi na powierzchnię, co objawia się oddzieleniem fragmentu warstwy przypowierzchniowej w postaci charakterystycznej cienkiej łuski.

ZUŻYWANIE DELAMINACYJNE STALI AISI 304

Zużycie delaminacyjne stali AISI 304 w warunkach tarcia ślizgowego (skojarzenie pin-on-disc) w 3,5% roztworze NaCl badał A. Szpunar [L. 6]. Dla zidentyfikowania tego procesu autorzy artykułu wykonali własne testy. Wykorzystano w tym celu prototypowe stanowisko z węzłem modelowym typu pin-on-disc [L. 9]. Podczas testów zastosowano trzpień z węglika spiekanego z zakończeniem w kształcie ściętego stożka. Średnica płaskiego wierzchołka wynosiła około 1,5 mm. Trzpień napędzany mechanizmem mimośrodowym przemieszczał się na dystansie 6 mm z częstotliwością 5 Hz. Do monitorowania zjawisk elektrochemicznych wykorzystano układ trójelektrodowy z precyzyjnym czterokanałowym potencjostatem ATLAS 9833. Jako elektrodę odniesienia wykorzystano nasyconą elektrodę kalomelową. Zasadnicze badania wykonano w 3,5% roztworze NaCl, stosując polaryzację potencjałem -120 mV(SCE). Jest to wartość o 300 mV wyższa od potencjału stacjonarnego. Testy realizowano dla czterech wartości nacisku normalnego: 0,36, 1,5, 5,5 i 10,5 MPa. W próbach z najmniejszym obciążeniem po 94000 przemieszczeń na powierzchni tarcia zaobserwowano cząstki zużycia w postaci „łusek” charakterystycznych dla zużywania delaminacyjnego (Rys. 1). Zdjęcie zglądu wykonanego wzdłuż śladu zużycia ilustruje propagację pęknięcia równoległe do powierzchni tarcia i oddzielanie przypowierzchniowej warstwy materiału próbki.

Małe naciski normalne powodują, że wskutek oddziaływań tarcio-
wych najprawdopodobniej nie jest usuwana (w każdym akcie styku) war-
stwa pasywnych tlenków. Obecność tej warstwy utrudnia powstawanie
szczepień adhezyjnych i sprzyja cyklicznym odkształceniom. Wskutek
kumulacji odkształceń następuje w warstwie przypowierzchniowej
umocnienie. W przypadku badanych próbek ze stali AISI 304 stwierdzo-
no wyraźny wzrost twardości (około 30%) w obszarze śladu zużycia – od
290 HV_{0,5} do 384 HV_{0,5}. „Utwardzona” warstwa narasta stopniowo, co
sprzyja powstawaniu w jej obrębie dyslokacji (zgodnie z koncepcją
przedstawioną w pracy [L. 10]), mogących stanowić miejsce zainicjowa-
nia pęknięcia. Czynnikiem umożliwiającym rozwój pęknięcia jest odpo-
wiedni rozkład naprężeń w warstwie przypowierzchniowej za przemiesz-
czającą się strefą styku występów chropowatości [L. 7].



Rys. 1. Ślad zużycia dla stali AISI 304 – zużycie delaminacyjne (3,5% NaCl; -120 mV(SCE), 0,36 MPa; 5 Hz, 94000 przemieszczeń)

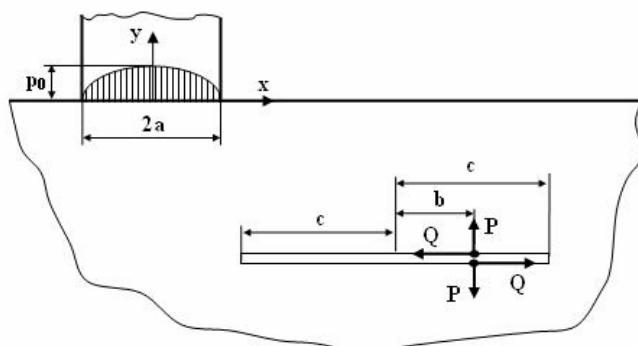
Fig. 1. Wear scars of AISI 304 – delamination (3,5% NaCl; -120 mV(SCE), 0,36 MPa; 5 Hz, 94000 strokes)

W przypadku badań wykonanych z obciążeniem rzędu 1,5–10,5 MPa nie zaobserwowano śladów charakterystycznych dla zużywania delaminacyjnego. Nie stwierdzono również znaczącego wzrostu twardości w obszarze śladu zużycia. Może to świadczyć, że w tych warunkach prawie każde oddziaływanie stykowe występów chropowatości powierzchni prowadzi do oddzielenia materiału podłoża wskutek mikroskrwania. Natychmiastowy ubytek materiału uniemożliwia kumulację odkształceń, a w konsekwencji powstanie przypowierzchniowej warstwy o własnościach sprzyjających zainicjowaniu i rozwojowi pęknięcia.

Dla porównania wykonano również test przy obciążeniu 0,36 MPa w bardziej agresywnym korozyjnie środowisku (0,5M H₂SO₄). Również w tych warunkach nie zaobserwowano zużycia delaminacyjnego. Najprawdopodobniej intensywniejsze procesy elektrochemiczne powodują usuwanie cyklicznie odkształcanej warstwy przed zainicjowaniem pęknięcia.

MODEL PROCESU ZUŻYWANIA DELAMINACYJNEGO

Teoria delaminacji została sformułowana przez N.P. Suha [L. 7]. Opracował on model wzrostu długości szczeliny (równoległej do powierzchni tarcia), pod wpływem wielokrotnych przesunięć pojedynczych występów chropowatości powierzchni. Na **Rysunku 2** przedstawiono schemat analizowanego układu. W modelu przyjęto, że średni nacisk normalny w strefie styku równy jest twardości (H) materiału. Przy eliptycznym rozkładzie nacisków w strefie kontaktu, maksymalny nacisk wynosi odpowiednio ($p_0 = H\pi/4$).



Rys. 2. Układ modelowy

Fig. 2. The model arrangement

Zaproponowany przez N.P. Suha model zakłada, że przyrost długości szczeliny odpowiadający jednemu cyklowi oddziaływań stykowych występów chropowatości jest funkcją stałych materiałowych i zmiany współczynnika intensywności naprężeń (ΔK). Jeśli wierzchołek szczeliny znajduje się w obszarze naprężeń ściskających, współczynnik intensywności naprężeń (K) przyjmuje wartość minimalną równą zero. Natomiast w obszarze działania naprężeń rozciągających współczynnik (K) jest funkcją naprężeń w otoczeniu strefy styku (σ_{ij}), współczynnika tarcia (μ), długości szczeliny w obszarze naprężeń rozciągających ($L = 2c$) i głębokości zalegania szczeliny. N.P. Suh przyjął założenie, że istnieje w zakresie naprężeń rozciągających pewna krytyczna długość szczeliny (L_c), od której zaczyna się propagacja ze stałą szybkością.

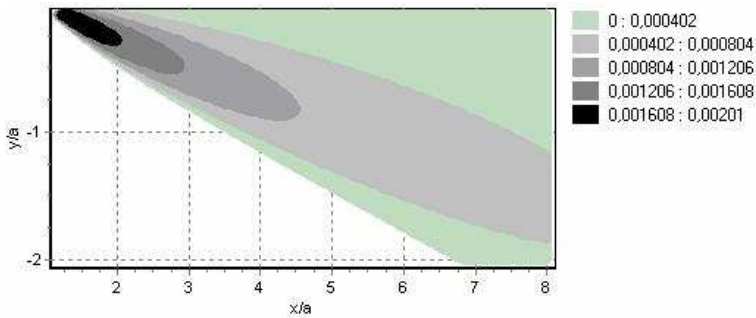
Rysunki 3 i 4 przedstawiają rozkład znormalizowanych wartości naprężeń rozciągających (σ_{yy}/p_0) i współczynnika intensywności naprężeń ($K_I\pi/(p_0\sqrt{c})$) w otoczeniu strefy styku. Na osiach wykresów zaznaczono znormalizowane wartości współrzędnych (współrzędna podzielona przez średnicę strefy styku (a)). Współrzędne (x) i (y) odpowiadają odległości punktu analizy od środka strefy styku mierzonej odpowiednio w poziomie i pionie. Naprężenia $\sigma(x,y)$ wyznaczono na podstawie modelu opracowanego przez W.-C. Wang [L. 11] poprzez zmodyfikowanie klasycznej teorii styku Hertza. Obliczenia wykonano dla współczynnika tarcia równego $\mu = 0,3$. Taką wartość zmierzono podczas testów tribokorozyjnych na stanowisku pin-on-disc. Współczynnik intensywności naprężeń (K) obliczono, wykorzystując poniższą zależność [L. 7]:

$$K = \int_{-L_e}^0 K'(x) \sigma(x, y) dx \quad (1)$$

Jako bazę oszacowania (w zakresie (K')) przyjęto rozwiązanie dla przypadku szczeliny w ośrodku nieograniczonym, obciążonej parą sił (P) i (Q) działających w punkcie o współrzędnej $x = b$ (**Rys. 2**). Rozwiązanie to dla I rodzaju obciążenia ma postać:

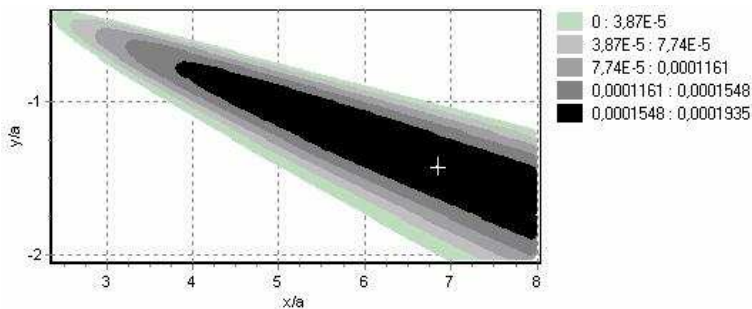
$$K_I = \frac{1}{2\pi\sqrt{c}} \left\{ P \left(\frac{c+b}{c-b} \right)^{1/2} + Q \frac{k-1}{k+1} \right\} \quad (2)$$

gdzie: $k = 3-4\nu$, ν – współczynnik Poissone'a.



Rys. 3. Rozkład naprężeń rozciągających (σ_{yy}/p_0) w otoczeniu strefy styku ($\mu = 0,3$)

Fig. 3. Stress (σ_{yy}/p_0) distribution in the sliding contact ($\mu = 0.3$)



Rys. 4. Rozkład współczynnika intensywności naprężeń ($K_I\pi/(p_0\sqrt{c})$) w otoczeniu strefy styku ($\mu = 0,3$)

Fig. 4. Stress intensity factor ($K_I\pi/(p_0\sqrt{c})$) distribution in the sliding contact ($\mu = 0.3$)

Obliczenia współczynnika (K_I) wykonano, przyjmując założenie, że szczelina w całości znajduje się w obszarze działania naprężeń rozciągających, a jej lewy wierzchołek (**Rys. 2**) zlokalizowany jest w punkcie odpowiadającym początkowi tego obszaru. Oś pionowa na **Rysunku 4** odpowiada głębokości zalegania pęknięcia.

Uzyskane wyniki wskazują, że współczynnik intensywności naprężeń (K_I) osiąga maksymalną wartość dla szczeliny o długości rzędu ($2a$), położonej na głębokości ($1,4a$) – punkt zaznaczony krzyżykiem. Tak zlokalizowane pęknięcie mogłoby (zgodnie z teorią N.P. Suha [**L. 7**]) propagować ze stałą szybkością w wyniku dalszych cyklicznych oddziaływań w styku tarciovym.

PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano wyniki badań zużywania delaminacyjnego stali AISI 304 w węzle ślizgowym typu pin-on-disc w warunkach tribokorozji. Stwierdzono, że przy małych naciskach normalnych nie następuje usuwanie warstwy pasywnych tlenków. Warstwa ta, utrudniając powstawanie szczepień adhezyjnych, sprzyja kumulacji odkształceń plastycznych. Cykliczne deformowanie warstwy przypowierzchniowej prowadzi do stopniowego jej utwardzenia. Towarzyszy temu powstawanie nieciągłości mogących zainicjować pęknięcie. Dalszy wzrost szczeliny determinowany jest odpowiednim rozkładem naprężeń w otoczeniu strefy styku.

Delaminację można uznać za przykład postulowanego przez G.P. Cherepanowa [**L. 4**] i J. Jianga [**L. 5**] modelu procesu zużywania korozyjno-mechanicznego poprzez propagację pęknięcia w głąb materiału.

LITERATURA

1. Adler T.A., Walters R.P., Corrosion and wear of 304 stainless steel using a scratch test. *Corrosion Science*, 1999, vol. 33, nr 12, s. 1855–1876.
2. Jemmely P., Mischler S., Landolt D., Tribocorrosion behavior of Fe-17Cr stainless steel in acid and alkaline solutions. *Tribology International*, 1999, vol. 32, s. 295–303.
3. Lazarev G.E., Osnovnye zakonomernosti iznašivanija korroziionnostojkich stalej i splavov pri trenii w elektrolitach. *Trenie i Iznos*, 1987, nr 2, s. 223–230.
4. Cherepanov A.G., Cherepanov G.P., K teorii ustalostno – korroziionnogo iznašivanija metallov. *Fiziko-Chimičeskaja Mechanika Materialov*, 1987, nr 1, s. 3–6.

5. Jiang J., Stack M.M., Neville A., Modelling the tribo-corrosion interaction in aqueous slipping conditions. *Tribology International*, 2002, vol. 35, s. 669–679.
6. Reza Betani M., Szpunar J.A., Wang X., Li D.Y., Wear and corrosion wear of medium carbon steel and 304 stainless steel. *Wear*, 2006, vol. 260, s. 116–122.
7. Fleming J.R., Suh N.P., Mechanics of crack propagation in delamination wear. *Wear*, 1977, vol. 44, s. 39–56.
8. Lawrowski Z., *Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2008.
9. Stachowiak A., Zwierzycki W., Zużycie korozyjno-mechaniczne stali 430 i 321 w warunkach tarcia ślizgowego. *Tribologia*, 2009, 2, s. 251–258.
10. Ye-Yuan Yang, Hong-Sheng Fang, The failure models induced by white layers during impact wear. *Wear*, 1995, vol. 185, s. 17–22.
11. Wang W-C., Chen Y-M., Lin M-S., Wu C-P., Investigation of the stress field of near-surface circular hole. *Society for Experimental Mechanics*, 2005, vol. 45, nr 3, s. 244–249.

Recenzent:

Dariusz OZIMINA

Summary

The paper presents the results on tests of corrosive and mechanical wear (tribocorrosion) of stainless steel AISI 304 in solution of 3.5% NaCl. The experiments were carried out on a technical stand with a model pair type pin-on-disc. The stand was designed and implemented in the Institute of Machines and Motor Vehicles of Poznań University of Technology. After tests on friction in a sliding pair for the steel AISI 304 in a solution of 3.5% NaCl at a pressure 0.36 MPa and mean sliding speed 60 mm/s, imprints characteristic for delamination wear were observed. The results of tests were illustrated by microscopic photos of the surface of wear and a microsection along the friction surface. Additionally, the results of numerical simulation (stress distribution in the sliding contact and stress intensity factor) were included. These results confirm the possibility of cracking (initiated in the dislocation points) parallel to the friction surface.