

PROCESY ZUŻYWANIA ELEMENTÓW UKŁADÓW ROZRZĄDU SILNIKÓW ZS

WEARS PROCESS OF DIESEL ENGINES TIMING GEAR SYSTEMS

W pracy przedstawiono zagadnienia teorii zużycia ruchomych elementów układów rozrządu silników ZS. W pracy przedstawiono poza tym analizę zjawisk zachodzących w styku ślizgowym i matematyczny opis zachodzących procesów.

Słowa kluczowe: powłoki nakładane cieplnie, zużycie, silniki ZS

This article presents problems of wear resistance of diesel engine elements. In the present work, phenomena occurring in sliding contact was reviewed and presents mathematical description of this process.

Keywords: thermal spray coatings, wear, diesel engine

1. Wprowadzenie

Pod wpływem sił tarcia warstwa wierzchnia materiałów elementów ruchomych, które stykają się ze sobą stopniowo ulega zużyciu. Zależnie od warunków zewnętrznych tarcia (obciążenia i jego rodzaju, prędkości obciążenia, temperatury, czynników zewnętrznych otaczającego środowiska) mogą wystąpić różne rodzaje zużycia, na przykład [1]: adhezyjne, utleniające, zmęczeniowe, ściernie, hydro – lub gazościernie, korozyjno – mechaniczne, erozyjne oraz kawitacyjne. Należy nadmienić, że w świetle najnowszych badań nad procesami zużycia wszystkie one ogólnie można określić jako procesy zmęczenia tarcowego, w których występuje niejednakowa, niszcząca liczba cykli naprężeń [1].

Maszyny i urządzenia są obiektami technicznymi, stanowiącymi złożoną strukturę w celu realizacji określonych funkcji użytkowych. W czasie realizacji tych funkcji ma miejsce starzenie się poszczególnych części w efekcie nieodwracalnych procesów fizycznych i chemicznych, stanowiących oddziaływanie mikro- i makrootoczenia. Procesy te powodują zużycie części maszyn, które w zależności od parametrów obciążenia może mieć formę procesów mechanicznych, chemicznych, cieplnych jak i elektrycznych [8].

Procesy zużycia prowadzą do zmiany struktury i wymiarów elementów stanowiących złożoną strukturę maszyn. Zmiany te prowadzą do powstania drgań, sił dynamicznych, obniżki sprawności mechanicznej, wzrostu temperatury itp., co po pewnym okresie eksploatacji powoduje uzyskanie tam zużycia granicznego poszczególnych części maszyn. W następstwie

maszyna lub urządzenie osiąga stan graniczny, tzn. przestaje spełniać warunki określone zbiorem cech charakteryzujących jej przydatność funkcjonalną. Stan graniczny może być również osiągnięty wskutek skokowych wymuszeń losowych [1-11].

Coraz częściej w przypadku zużytych części stosuje się zabiegi regeneracji. Zastosowanie napawania regeneracyjnego umożliwia odtworzenie i kształtowanie właściwości warstwy wierzchniej współpracujących elementów.

2. Stochastyczne modele zużycia

Najczęściej stosowanymi matematycznymi modelami zużycia są elementarne procesy stochastyczne z czasem ciągłym i nieprzeliczalnym zbiorem stanów

$$Z = \{Z(t) : 0 \leq t < \infty\}$$

gdzie $Z\{t\}$ jest zmienną losową opisującą zużycie w chwili t , których realizacje aproksymuje się z dostateczną dokładnością krzywą Lorenca. Krzywa Lorenca stanowi uniwersalny model prędkości zużycia w czasie, który charakteryzuje się trzema etapami intensywności zużycia [8]:

- etap docierania – intensywność zużycia jest malejąca,
- etap ustalonego zużycia – nie ma zmian intensywności zużycia,
- etap przyspieszonego zużycia – systematyczny wzrost intensywności zużycia.

Zasadność stosowania krzywej Lorenca w badaniach przebiegu zużycia potwierdzają wyniki licznych badań doświadczalnych [1].

Jako analityczny opis krzywej Lorenca możemy przyjąć[1]:

$$Z(t) = \begin{cases} g_d(t), & 0 \leq t < t_d, \\ c + v(t-t_d), & t_d \leq t < t_p, \\ g_p(t), & t \geq t_p, \end{cases} \quad (1)$$

gdzie: t_d oznacza chwilę zakończenia etapu docierania, t_p oznacza chwilę zakończenia etapu ustalonego zużycia, $c = g_g(t_d)$ oznacza wartość zużycia po zakończeniu etapu docierania, v oznacza intensywność ustabilizowanego zużycia

Aby rozważany model matematyczny dobrze opisywał przebieg zużycia ważny jest dobór funkcji g_d i g_p . Typowe badania eksperymentalne zakładają dyskretyzację czasu. Zatem wybór funkcji g_d i g_p ma charakter przybliżony co daje wiele możliwości opisów zużycia. W literaturze możemy spotkać następujące modyfikacje krzywej Lorenca[1]:

- *Model degresywny*

Model ten zakłada malejący charakter intensywności zużycia podczas eksploatacji obiektu. Stanowi on więc przypadek krzywej Lorenca o nieograniczonej fazie docierania. Równanie degresywnych zmian zużycia otrzymujemy kładąc w (1) $t_d = t_p = \infty$. Zatem zużycie w modelu degresywnym wyraża się zależnością:

$$Z(t) = g_d(t), \quad t \geq 0 \quad (2)$$

gdzie: g_d jest rosnącą funkcją wypukłą.

Jako funkcję g_d możemy przyjąć modyfikacje funkcji logarymicznych o podstawach większych od 1 lub modyfikacje funkcji potęgowych o wykładnikach ułamkowych.

- *Model liniowy*

Intensywność zużycia obiektu w czasie jego eksploatacji ma wartość stałą. Zatem wykresem przebiegu jest linia prosta, a jego przebieg opisuje zależność dla $t_d = 0$ i $t_p = \infty$, zatem,

$$Z(t) = u + Vt, \quad t \geq 0 \quad (3)$$

Często używany do opisu przebiegu zużycia model liniowy ze względu na swoją prostotę i możliwość zastosowania w przypadkach, w których niemożliwa jest częsta rejestracja zmian zużycia.

- *Model progresywny*

Zakłada progresywny zakłada rosnący charakter intensywności zużycia podczas eksploatacji obiektu. W przypadku tym zakłada się że etap docierania jest pomijalnie krótki. Równanie progresywnych zmian zużycia otrzymamy z (1) przyjmując $t_d = t_p = 0$. Przyjmuje ono postać:

$$Z(t) = g_p(t), \quad t \geq 0 \quad (4)$$

gdzie: g_p jest rosnącą funkcją wklęsłą.

Jako funkcje g_g można przyjąć modyfikacje funkcji wykładniczych o podstawach większych od 1 lub modyfikacje funkcji potęgowych o wykładnikach naturalnych.

- *Model degresywno – progresywny*

Model ten opisuje sytuację kiedy zużycie zachodzi w dwóch etapach:

- etap docierania eksploatacyjnego,
- etap przyspieszonego zużycia

i jest złożeniem modeli degresywnego i progresywnego.

Matematyczny opis tego modelu możemy otrzymać korzystając ze wzoru (1) i dokonując podstawienia $t_d = t_p$ w następującej postaci:

$$Z(t) = \begin{cases} g_d(t), & 0 \leq t < t_d \\ g_p(t) & t \geq t_d \end{cases} \quad (5)$$

- *Model degresywno – liniowy*

Model ten przedstawia przebieg zużycia w następujących etapach:

- etap docierania
- etap ustabilizowanego zużycia.

Podstawiając $t_p = \infty$ do (1) otrzymamy opis matematyczny tego modelu w postaci:

$$Z(t) = \begin{cases} g_d(t), & 0 \leq t < t_d \\ c+v(t-t_d), & t \geq t_d \end{cases} \quad (6)$$

- *Model progresywno – liniowy*

Założeniem tego modelu jest że zużycie przebiega w następujących etapach:

- etap ustabilizowanego zużycia,
- etap intensywnego zużycia.

Opis matematyczny otrzymamy z (1) wstawiając $t_d = 0$ w następującej postaci:

$$Z(t) = \begin{cases} c+v(t-t_d), & 0 \leq t < t_p \\ g_p(t), & t \geq t_p \end{cases} \quad (7)$$

Model ten jest złożeniem modelu progresywnego i liniowego.

Do opisu przebiegu zużycia elementów układu rozrządu (dźwigienki zaworowe) możemy wykorzystać pewną aproksymację modelu degresywno – liniowego, którą otrzymamy poprzez odpowiedni dobór funkcji g_d oraz wielkości c i v . Aproksymacja rozważanego modelu nie może być związana ani z przebiegiem funkcji g_p , ani z czasem trwania etapu docierania eksploatacyjnego t_d . Wynika to z faktu, że w modelu degresywno – liniowym występuje nieskończenie wiele parametrów. Jednakże model ten jest jednoznacznie zdefiniowany przez chwilę

zakończenia etapu docierania t_d , intensywność zmian zużycia ustabilizowanego v i wartość funkcji g_d w przedziale $[0, t_d]$.

W przypadku współpracy omawianych elementów układów rozrządów silników ZS możemy mieć do czynienia z sytuacją gdy po dość długim i ustabilizowanym okresie współpracy elementów, gdy intensywność zużycia była stała, następuje okres zużycia przyspieszonego. Sytuację taką możemy przedstawić przy pomocy modelu progresywno – liniowego który w dużym stopniu przedstawia taki charakter przebiegu procesów zużycia. Model ten jest jednoznacznie zdefiniowany przez chwilę zakończenia etapu ustabilizowanego zużycia i początku etapu zużycia przyspieszonego $[t_p]$.

Istnieje wiele parametrów mających wpływ na przebieg procesów zużycia dźwigniów górnozaworowych układów rozządu: geometria całych elementów, geometria ich powierzchni, temperatura pracy, właściwości środków smarnych, właściwości stosowanych materiałów do cieplnego wytworzenia ww, itp.

3. Procesy zużycia

Obserwując przebieg procesu docierania współpracujących ze sobą elementów maszyn i urządzeń możemy zaobserwować przyspieszone zużycie w początkowej fazie współpracy elementów, lecz z czasem intensywność zużycia maleje aż po zakończeniu etapu docierania stabilizuje się i możemy przyjąć, że ma wartość stałą.

W przypadku zwiększonego zużycia współpracujących ze sobą elementów jak np. elementy górnozaworowych układów rozządu silników ZS, w układzie takim pojawiają się siły wypadkowe mające charakter udarowy powodując wzrost intensywności zużycia i najczęściej zmianę charakteru zużycia powodując w skrajnych przypadkach awarię całego silnika.

Warunki obciążenia i geometria styku współpracujących ze sobą elementów decydują o formie zniszczenia kontaktowego. Do typowych przypadków zniszczenia tego rodzaju należą [8]: odkształcenie plastyczne, zużycie adhezyjne, zużycie ścierne, zmęczenie powierzchniowe (pitting), zużycie ścierne warstewki tlenków i zużycie warstewki reakcyjnej.

Do analizy zużycia kontaktowego układów niejednorodnych można przyjąć założenia Archarda, że współczynnik zużycia k jako prawdopodobieństwo oderwania się cząstki nierówności od powierzchni definiowany jest w następujący sposób [8]:

$$k \cong A_o/A \cong \sigma_z/H \quad (8)$$

gdzie: A_o – rzeczywista powierzchnia kontaktu, A – powierzchnia nierówności, σ_z – naprężenie normalne w styku, H – twardość zużywanego materiału.

Zużycie może następować poprzez odrywanie się cząstek fazy twardej, osnowy lub występować na ich granicy. Zatem o zużyciu decyduje twardość poszczególnych faz oraz ogólna twardość napoiny. Również kruchość tych faz może mieć znaczenie przy ocenie odporność napoiny na zużycie kontaktowe.

Zużycie kontaktowe napoין o strukturze niejednorodnej ww może prowadzić do następujących zjawisk [8]:

- wzrostu naprężeń normalnych i stycznych w miejscu styku, które powodują odkształcenia sprężyste i plastyczne,
- ścierania i powstawania produktów tego ścierania
- powstawania mikropęknięć powierzchniowych oraz
- ścierania i mikropęknięcia powierzchniowego.

W większości przypadków wielkość zużycia kontaktowego napoין jest odwrotnie proporcjonalna do ich ogólnej twardości. Ta prawidłowość jest ogólnie przyjmowana zgodnie z pracami Archarda. W przypadku materiałów niejednorodnych prawidłowość to jest ważna tylko do pewnej granicznej zawartości fazy twardej [8].

W warunkach eksploatacji występują zazwyczaj jednocześnie różne mechanizmy zużycia i stosowanie ścisłych klasyfikacji mechanizmów zużycia jest bardzo utrudnione [11]. Z. Gahr przedstawiając zagadnienia zużycia przyjął jako punkt wyjścia charakter ruchu względnych ciał uczestniczących w procesie zużycia i wyróżnił: zużycie zdominowane przez mechanizm ścierny, zużycie ślizgowe, zużycie przy ruchu toczno – ślizgowym i zużycie erozyjne [3, 11].

4. Podsumowanie

Dokładna analiza zjawisk zachodzących podczas zużycia, jak również matematyczny i geometryczny opis zużytych powierzchni pozwoli w większym stopniu zrozumieć i poznać zjawiska zachodzące podczas procesów ich zużycia. Matematyczny opis procesów zużycia nigdy nie będzie na tyle dokładny aby przedstawić przy jego pomocy wszystkie zjawiska zachodzące podczas procesów zużycia jednak w dużym stopniu pomaga poznać i zrozumieć zjawiska zachodzące w omawianych procesach. Jednakże oprócz badań teoretycznych muszą przeprowadzane być badania eksperymentalne laboratoryjne i eksploatacyjne, w celu weryfikacji opisanych teorii.

5. Literatura

- [1] Niewczas A., Czerniec M., Ignaciuk P.: *Badania trwałości elementów maszyn współpracujących tarcioowo*. Lublin 2000 IZT.
- [2] Nowak B.: *Regeneracja typowych elementów pojazdów samochodowych*, WKŁ, Warszawa, 1985.
- [3] Pilarczyk J.: *Spawanie i napawanie elektryczne metali*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 2000.
- [4] Shohat U., Krasny E., Stotter A.: *Report 011-147*. Israel Institute of Metals, Technions, Haifa, Israel 1977.
- [5] Sławiński Z.: *Badanie miejscowych parametrów wymiany ciepła w cylindrze szybkoobrotowego silnika wysokoprężnego z doładowaniem*. Praca doktorska 1979.
- [6] Smith R.W., Fast R.D.: *Future of thermal spray technology*. Welding Journal, Vol. 73, No. 7, 1994, p.43-50.
- [7] Weroński A., Hejwowski T.: *Wytwarzanie powłok odpornych na zużycie*. PL WU 2000.
- [8] Adamiec P., Dziubiński J.: *Pękanie i trwałość napawanych części maszyn*. Gliwice 1995 WPS.
- [9] Weroński A., Zwierzchowski M.: *Powłoki podwyższające odporność na zużycie wybranych elementów silników*. Przegląd Spawalnictwa 5/2003 Agenda Wydawnicza SIMP W-wa 2003.
- [10] Zwierzchowski M.: *Wpływ struktury i właściwości materiałów elementów układów rozrządu silników ZS na przebieg zużycia*. III Sympozjum doktoranckie. Materiały konferencyjne. Politechnika Lubelska 2004. str.1-5.
- [11] Hejwowski T.: *Studium procesów zużywania erozyjnego, ściernego i zmęczenia cieplnego elementów maszyn oraz kształtowanie struktur o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych*. WPL 2003 Lublin.

Wydanie publikacji dofinansowane przez Ministra Nauki i Informatyzacji w ramach Projektu Badawczego nr 4
T12D 033 28

Mgr inż. Maciej ZWIERZCHOWSKI

Katedra Inżynierii Materiałowej

Politechnika Lubelska

Ul. Nadbystrzycka 36

20-618 Lublin

tel. 81 538-12-11

email: m.zwierzchowski@pollub.pl
