

Modelowanie procesu wywołującego zacieranie adhezyjne (szepianie) w parach precyzyjnych hydraulicznych urządzeń regulacyjnych

Streszczenie

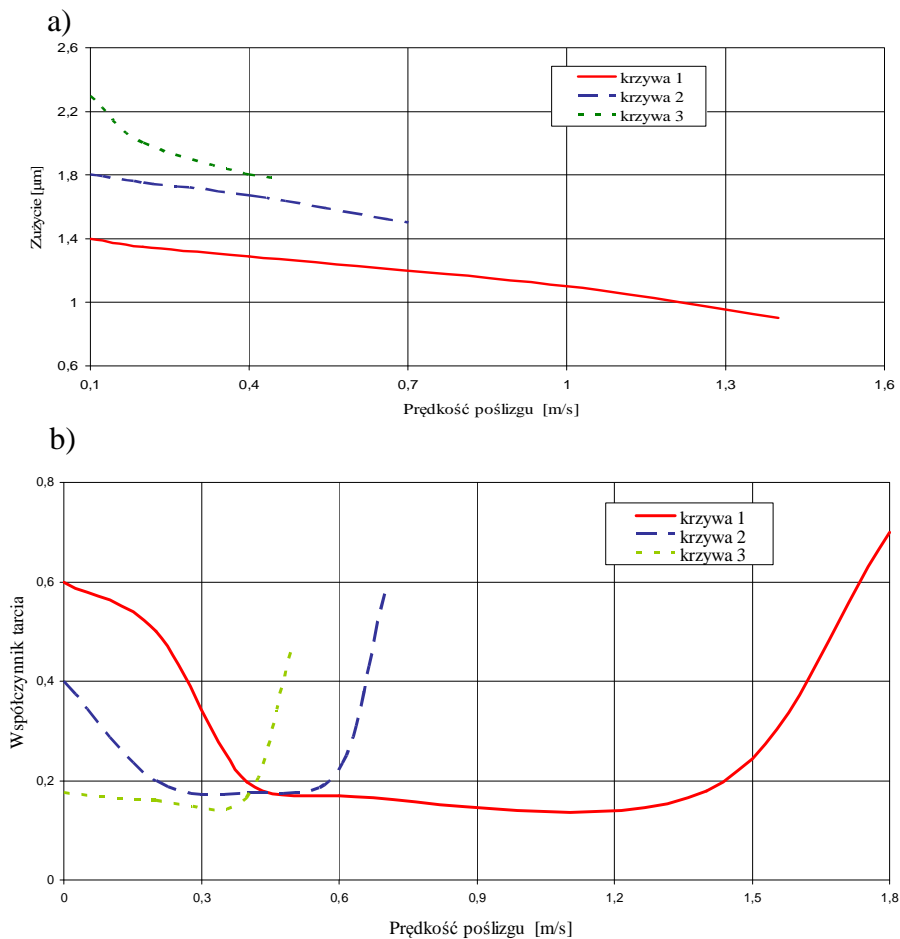
Brak pełnej wiedzy w zakresie wpływu warunków pracy par precyzyjnych zespołów hydraulicznych na charakter powstawania w nich procesów destrukcyjnych powoduje, że na etapach projektowania i wytwarzania nie uwzględnia się tych warunków. Jednym z takich mało opisanych zagadnień są czynniki wywołujące zacieranie adhezyjne (szepianie), powstające w procesie wzajemnego oddziaływania powierzchni suwakowych par hydraulicznych urządzeń regulacyjnych przy obciążeniu kontaktowo-wibracyjnym. W artykule przedstawiono ogólną charakterystykę i mechanizmy wywołujące zacieranie adhezyjne (szepianie) w hydraulicznych parach precyzyjnych urządzeń regulacyjnych przy obciążeniu kontaktowo-wibracyjnym. Zaprezentowano model opisujący proces wywołujący zacieranie adhezyjne w suwakowej parze hydraulicznej przy jej obciążeniu kontaktowo – wibracyjnym. Model pozwala przeprowadzić zarówno jakościową, jak i ilościową analizę wpływu parametrów wibracji i obciążenia na wystąpienie zacierania adhezyjnego (szepiania) w suwakowych parach hydraulicznych urządzeń regulacyjnych. Praktyczne wykorzystanie modelu wymaga określenia wartości współczynników charakteryzujących intensywność odtwarzania i opór ścierania tlenków metalu ze współpracujących powierzchni pary hydraulicznej. Przedstawiono empiryczną metodę szacowania współczynników modelu i przykład szacowania współczynników modelu dla ogranicznika narastania ciśnienia.

Słowa kluczowe: lotnictwo, napęd hydrauliczny, hydrauliczna para precyzyjna, zacieranie adhezyjne, szepianie

1. Wstęp

Jednym z ważniejszych zadań w kompleksie działań na rzecz podnoszenia jakości użytkowej napędu hydraulicznego są badania wpływu warunków pracy hydraulicznych par precyzyjnych na proces ich zużycia, czyli trwałość napędu hydraulicznego [1,6,7,8,13,19,20,23,24]. Na podstawie danych dostępnych w literaturze naukowo-technicznej dotyczących procesów zużycia par precyzyjnych i hydraulicznych par precyzyjnych można stwierdzić, że dominującym w nich procesem zużycia powinno być zużycie wskutek utleniania [1,3,4,5,11,13,14,21]. Dominowanie podczas pracy hydraulicznej pary precyzyjnej procesu zużycia wskutek utleniania gwarantuje małą intensywność zużywania się współpracujących powierzchni pary [1,4,5,13,14]. Zużycie wskutek utleniania uwarunkowane jest przede wszystkim zachowaniem podczas pracy obciążenia (nacisków i prędkości poślizgu) elementów hydraulicznej pary precyzyjnej poniżej wartości krytycznej (rys. 1) [21]. Na rys. 1 przedstawiono zależność zużycia i współczynnika tarcia od prędkości poślizgu dla skojarzenia pary hydraulicznej wykonanej ze stali 12HN3A (HRC = 60) i stali EI-928 (HRC = 60) w środowisku oleju hydraulicznego ASF-41 w temperaturze około 293 K i naciskach $P_{os} = 100\text{ N}, 600\text{ N}, 1400\text{ N}$. Przy nadkrytycznych wartościach prędkości poślizgu następuje skokowa i gwałtowna zmiana ilościowa współczynnika tarcia pomiędzy powierzchniami elementów pary hydraulicznej (rys. 1b). Po osiągnięciu krytycznej prędkości poślizgu zainicjowany zostaje proces zacierania adhezyjnego i na powierzchniach trących

zaczynają dominować procesy szepiania metalowych powierzchni pary hydraulicznej [10,12,18,21].



Rys. 1. Zależność zużycia (a) i współczynnika tarcia (b) od prędkości poślizgu pary hydraulicznej ze stali 12HN3A i stali EI-928 [21]

1-nacisk $P_{os} = 100$ N, 2- nacisk $P_{os} = 600$ N, 3- nacisk $P_{os} = 1400$ N

Chociaż wiedza o mechanizmach zużycia znacznie się rozwinęła, to nadal brakuje ogólnego obrazu procesu oddziaływań w określonych warunkach współpracy elementów pary precyzyjnej. Przy badaniach uszkodzalności skojarzonych powierzchni metalowych w warunkach stycznych przemieszczeń wibracyjnych zazwyczaj całą uwagę poświęcano rozwojowi fretting-korozi, tj. procesom ścierno-utleniającym, a nie szepianiu [3,4,10,11,14]. Tłumaczy się to tym, że przy tarciu wibracyjnym i utlenionej strefie kontaktu powstają uszkodzenia w postaci wżerów, wypełnionych produktami uszkodzenia, składających się głównie ze sproszkowanych tlenków trących się metali [4,14,18]. Do rozwoju takiego procesu wystarczają względne przemieszczenia stykających się odcinków skojarzonych powierzchni o wielkości części mikrometra. Istnieje pogląd, że w początkowym stadium procesu fretting-korozi powstaje szepianie w mikro odcinkach kontaktu powierzchni. Szepianie zostaje przerwane w miarę nagromadzenia w strefie kontaktu produktów zużycia skojarzonych powierzchni [1,3,15]. W przytoczonych pracach nie rozpatruje się wpływu stosunku wymiarów powierzchni stykania się i wielkości przemieszczenia elementów pary hydraulicznej, oraz okresowości naruszenia kontaktu, na powstanie i rozwój szepiania przy wibracyjnym poślizgu. Dlatego wyniki takich badań nie mogą być wykorzystane do wyjaśnienia przyczyn i prawidłowości wystąpienia zacierania adhezyjnego (szepiania)

w hydraulicznych par precyzyjnych, przejmujących obciążenia kontaktowo-wibracyjne. Wyróżniającymi właściwościami warunków szepiania w hydraulicznych parach precyzyjnych przy wibracyjnym poślizgu są małe wielkości względnych przemieszczeń skojarzonych powierzchni i dynamika obciążenia z powodu nieprzerwanej zmiany prędkości poślizgu.

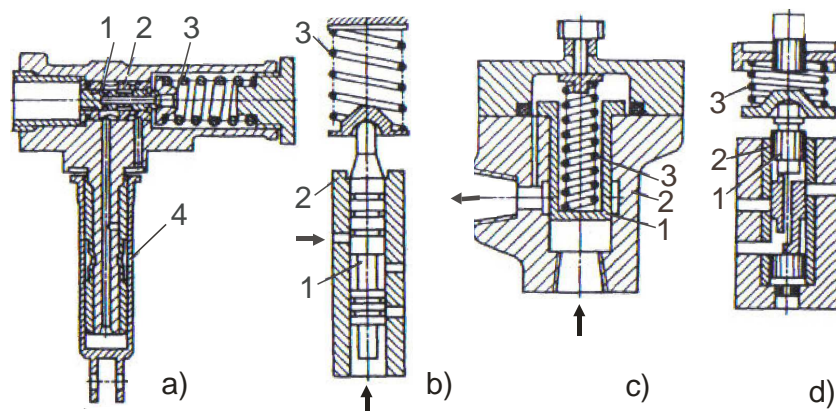
Identyfikacja czynników wywołujących zacieranie adhezyjne (szepianie) w parach precyzyjnych hydraulicznych urządzeń regulacyjnych i model tego zjawiska pozwoli przeprowadzić zarówno jakościową, jak i ilościową analizę wpływu parametrów wibracji i obciążenia na wystąpienie zacieranie adhezyjnego (szepiania) w suwakowych parach hydraulicznych urządzeń regulacyjnych.

2. Przedmiot i cel pracy

Z danych pochodzących z eksploatacji statków powietrznych wynika, że znaczna ilość uszkodzeń lotniczych napędów hydraulicznych spowodowana jest zacieraniem adhezyjnym (szepianiem) par suwakowych hydraulicznych urządzeń regulacyjnych [21,23,24]. Pary suwakowe hydraulicznych urządzeń regulacyjnych (rys. 2) przedstawiają sobą elementy postrzegające i regulujące, automatycznie ograniczające lub zmieniające wg zadanego programu ciśnienie, jego spadek (różnicę ciśnień) w połączonych pojemnościach (przestrzeniach), lub wydatek cieczy roboczej. Pary suwakowe hydraulicznych urządzeń regulacyjnych wg kryterium kinematyki ich ruchu i warunków obciążenia charakteryzują się następującymi cechami [21]:

- suwak przenosi dwustronne zmienne obciążenie osiowe wywołane ciśnieniem cieczy roboczej i sprężyną,
- suwak wykonuje ciągły ruch postępowo-zwrotny względem cylindra na skutek zmian ciśnienia cieczy roboczej i ruchu zwrotnego sprężyny,
- względna prędkość poślizgu suwaka w stosunku do cylindra oraz jego przyspieszenie zależne są od wartości wydatku cieczy roboczej dopływającej do pary hydraulicznej, sztywności sprężyny i masy suwaka,
- suwak ulega przekazaniu pod działaniem zawsze istniejącego mimośrodowo przykładanych do suwaka wypadkowych sił ciśnienia cieczy roboczej i sprężyny,
- suwak drga w kierunku osiowym w wyniku pulsacji ciśnienia cieczy roboczej.

Pary suwakowe hydraulicznych urządzeń regulacyjnych pracują więc w warunkach ślizgania przy obciążeniu kontaktowo-wibracyjnym, przejmując tylko obciążenia osiowe.

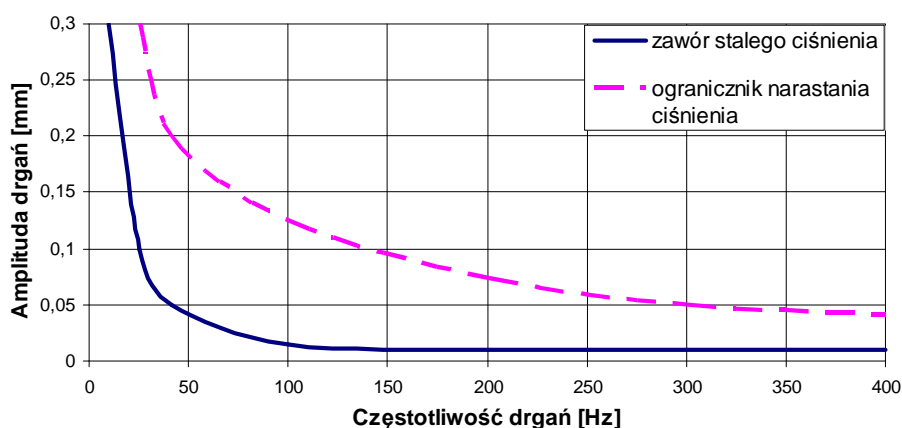


Rys. 2. Schematy regulacyjnych par suwakowych: zawór proporcjonalny (a), zawór stałego ciśnienia (b), zawór przelewowy (c) i ogranicznik narastania ciśnienia (d)

1-suwak; 2-tuleja (korpus); 3-sprężyna; 4-korpus regulatora wydajności

Cylindryczny suwak pary hydraulicznej ulega zazwyczaj przekaszaniu pod działaniem zawsze istniejącego mimośrodowo przykładanych do suwaka wypadkowych sił ciśnienia cieczy roboczej i sprężyny. Ponadto przekaszanie lub jednostronne promieniowe dociskanie suwaka do tulei spowodowane jest siłą promieniową powstającą w wyniku utraty stateczności sprężyny suwakowej pary hydraulicznej. Wskutek przekoszenia suwaka w tulei siła ciśnienia cieczy i osiowa składowa siła sprężyny tworzą parę. Wielkość momentu zależy od wielkości luzu w parze suwakowej i luzu między główką suwaka i sprężyną.

W procesie pracy elementy hydraulicznych par suwakowych urządzeń regulacyjnych w sposób ciągły lub okresowo, w wyniku zmieniającego się ciśnienia cieczy roboczej, wykonują względne przemieszczenia postępowo-zwrotne z różną częstotliwością i amplitudą [2,6,7,8,9,17,19,20]. Przy tym częstotliwość i amplituda przemieszczeń zależą od charakteru zmiany ciśnienia (pulsacji) cieczy roboczej i zmieniają się w zależności od zakresu pracy zespołu regulacyjnego. Amplituda przemieszczania suwaka zależy od wielkości zmiany ciśnienia cieczy i sztywności sprężyny [2,19,21]. W przypadku pokrycia się częstotliwości pulsacji ciśnienia i częstotliwości własnej suwaka ze sprężyną mogą powstawać drgania rezonansowe [19,20]. W określonych zakresach pracy suwak urządzenia regulacyjnego może mieć złożony charakter przemieszczeń wibracyjnych. Badania eksperymentalne wykazały, że wielkość amplitudy przemieszczenia suwaka zmienia się w zależności od częstotliwości [20,22]. W miarę zwiększania częstotliwości przemieszczeń od 30Hz do 500Hz amplituda odpowiednio zmienia się od 0,3mm do 0,005mm (rys. 3) [21].



Rys. 3. Zakres parametrów wibracji, któremu dopowiadają warunki pracy regulacyjnych par suwakowych

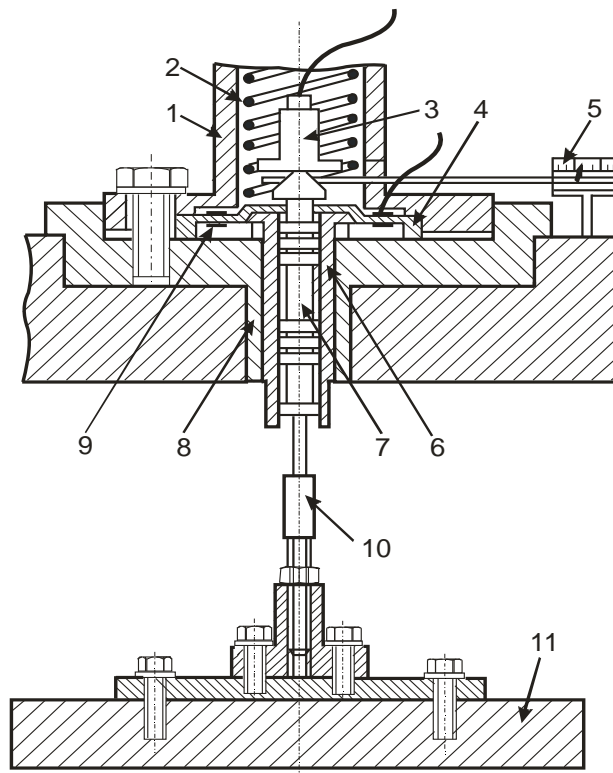
Celem pracy jest przedstawienie i omówienie czynników wywołujących zacieranie adhezyjne (szepianie) w parach precyzyjnych hydraulicznych urządzeń regulacyjnych oraz przedstawienie modelu tego zjawiska. Model powinien umożliwiać jakościową i ilościową analizę wpływu parametrów wibracji i obciążenia na wystąpienie zacierania adhezyjnego (szepiania) w hydraulicznych parach precyzyjnych.

3. Zacieranie adhezyjne w hydraulicznych parach suwakowych urządzeń regulacyjnych przy obciążeniu kontaktowo-wibracyjnym

Pod pojęciem zacierania adhezyjnego w hydraulicznych parach suwakowych urządzeń regulacyjnych rozumiemy samo zanikający proces szepiania, powstający na oddzielnych, lokalnych kwasi stacjonarnych kontaktach elementów pary pracującej w warunkach poślizgu wibracyjnego, bez wzrostu temperatury w warstwie wierzchniej metalu [14,21].

Badania par suwakowych hydraulicznych urządzeń regulacyjnych wykazały, że ich zacieraniu adhezyjnemu (szepianiu) sprzyjają: przekaszanie się cylindrycznego suwaka pary hydraulicznej pod działaniem zawsze istniejącego mimośrodu przykładanych do suwaka wypadkowych sił ciśnienia cieczy roboczej i sprężyny oraz ciągłe lub okresowe względne przemieszczenia postępowo-zwrotne elementów pary z różną częstotliwością i amplitudą [13,19,21,22]. Wyróżniającymi własnościami warunków wystąpienia zacierania adhezyjnego w parach suwakowych hydraulicznych urządzeń regulacyjnych przy obciążeniu kontaktowo-wibracyjnym są małe wielkości względnych przemieszczeń skojarzonych powierzchni pary suwakowej, wielkość prędkości poślizgu oraz szybkość tworzenia warstewek tlenków metalu na współpracujących powierzchniach pary hydraulicznej i szybkość ich ścierania.

Dla określenia najbardziej sprzyjających zakresów wibracji, z punktu widzenia wystąpienia zacierania adhezyjnego (szepiania) na współpracujących powierzchniach pary suwakowej, wykonano badania eksperymentalne na stanowisku imitującym wibracyjny charakter przemieszczania elementów pary pod działaniem pulsacji ciśnienia cieczy roboczej. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat stanowiska imitującego wibracyjny charakter przemieszczania elementów suwakowej pary hydraulicznej pod działaniem pulsacji ciśnienia cieczy roboczej

1) korpus zaworu, 2) sprężyna, 3) czujnik wibracji, 4) pierścień sprężysty, 5) czujnik siły; 6) tuleja pary hydraulicznej, 7) suwak pary hydraulicznej, 8) korpus przyrządu, 9) czujnik tensometryczny, 10) trzon płyty wibracyjnej z czujnikiem wibracji, 11) płyta urządzenia wibracyjnego

Parę precyzyjną mocuje się w przyrządzie pozwalającym na wykonanie przemieszczeń suwaka od wibracji płyty urządzenia wibracyjnego. Do przestrzeni pary suwakowej wprowadza się olej hydrauliczny ASF-41. Nieruchomy suwak pary hydraulicznej (7 rys. 4) wkładany jest swobodnie do tulei (6) centralnego otworu korpusu przyrządu (8). Pierścień sprężysty (4) utrzymuje tuleję w kierunku osiowym. Jest jednocześnie elementem postrzegającym przy pomiarze siły tarcia w parze hydraulicznej. Centralną częścią pierścienia (4) jest nakładany na główkę tulei (6) a na obwodzie dociskany kołnierzem korpusu zaworu (1) do korpusu przyrządu. Na przesmykach łączących centralną i zewnętrzną część

pierścienia (4) naklejane są czujniki tensometryczne (9) reagujące na odkształcenia przesmyków przy dążeniu tulei do przemieszczenia się do góry. Ponieważ tuleja może przemieszczać się w kierunku osiowym tylko pod działaniem sił tarcia suwaka, czujniki w procesie badania rejestrują tarcie w parze hydraulicznej. Wzdłużne przemieszczenia wibracyjne przekazywane są do suwaka (7) poprzez trzon (10), umocowany na płycie wibrującej (11) stanowiska. Od góry na suwak poprzez przejściowy talerz oporowy, mający kulistą powierzchnię styku, działa sprężyna robocza elementu regulacyjnego. W zależności od potrzeb (wymagań), w procesie prowadzenia badań może być zmieniany stopień ściśnięcia sprężyny (efekt utraty stateczności oddziałującej na suwak sprężyny).

Na wyżej opisanym stanowisku wibracyjnym wykonane zostały badania eksperymentalne pary suwakowej regulatora ciśnienia. Średnia długość badań wynosiła 15 min. Suwak regulatora dociskany był osiowo siłą sprężyny dociskającej o wartościach 50 – 100N i bocznie siłą 25 – 50N. Wyniki badań eksperymentalnych pary suwakowej regulatora ciśnienia na stanowisku wibracyjnym w środowisku oleju ASF-41 przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki badań eksperymentalnych elementów regulatora ciśnienia na stanowisku imitującym wibracyjny charakter przemieszczania elementów pary hydraulicznej

Zakres wibracji [mm]	Charakter zużycia
< 0,005	Szczepianie słabo uwidocznione, (małe wymiary).
0,005 – 0,1	Stabilne odwzorowywanie szczepiania powierzchni pary suwakowej. Przy amplitudzie 0,01mm - szczepianie przy obciążeniu około 30N. Przy amplitudzie 0,05mm - szczepianie przy obciążeniu z przedziału 40–50N.
> 0,1	Ślady charakterystyczne dla intensywnego utleniającego zużycia powierzchni metalowych.

Na podstawie badań eksperymentalnych, ustalono, że najbardziej sprzyjającym z punktu widzenia powstania szczepiania jest zakres wibracji w przedziale amplitud 0,005 – 0,1mm. W tym przedziale amplitud podczas badań stabilnie odwzorowywano szczepianie powierzchni pary suwakowej. Przy amplitudach poniżej 0,005mm uszkodzenia powodowane szczepianiem, w wielu przypadkach były słabo uwidocznione, zazwyczaj z powodu ich małych wymiarów. Ślady na powierzchni suwaków, powstające przy amplitudach wyższych od 0,1mm w większości przypadków były charakterystyczne dla intensywnego utleniającego zużycia powierzchni metalowych. Ustalono również, że promieniowe obciążenie suwaków, niezbędne do szczepienia elementów pary suwakowej wzrasta przy zwiększeniu amplitudy. Przy amplitudzie 0,01mm obciążenia przyłożone do suwaka przy szczepianiu wynoszą średnio 30N, zaś przy amplitudzie 0,05mm zawierają się w przedziale 40 – 50N.

Przy ślizganiu się znajdujących się w kontakcie powierzchni elementów suwakowej pary hydraulicznej, jednocześnie przebiegają procesy ścierania i tworzenia tlenków metalu. Przy określonym stosunku intensywności procesów obciążenia oraz ścierania i odtwarzania tlenków metalu na współpracujących powierzchniach pary suwakowej możliwe jest tworzenie czystych powierzchni pozbawionych warstewki tlenków metalu (powierzchni czystych). Tworzenie się powierzchni czystych jest możliwe tylko przy określonym skojarzeniu prędkości niszczenia i tworzenia tlenków oraz absorbowanych na powierzchni błonek olejowych. Gdy szybkość tworzenia warstewek tlenków metalu na współpracujących powierzchniach pary hydraulicznej jest większa od szybkości ich ścierania z powierzchni

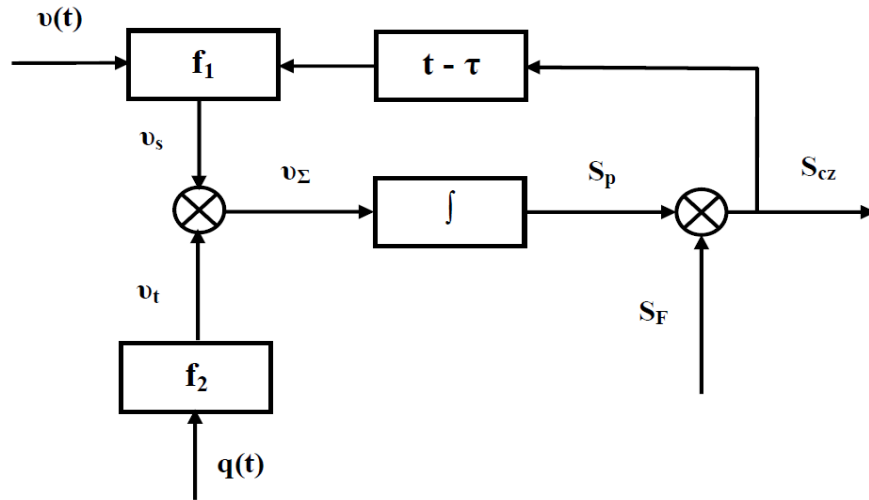
występuje zużycie przez utlenianie, gdy szybkość tworzenia warstewek tlenków metalu na współpracujących powierzchniach pary hydraulicznej jest mniejsza od szybkości ich ścierania z powierzchni rozpoczyna się proces zacierania adhezyjnego (sczepianie). Wielkość powierzchni pozbawionych tlenków metalu (powierzchni czystych) zależy od stopnia opóźnienia procesu tworzenia się tlenków (reakcji utleniania), tj. od czasu ścierania warstewki tlenków metalu do ich utworzenia ponownie na powierzchniach czystych (wzrost warstewki tlenków metalu) [9,16,18].

Z teoretycznego punktu widzenia zwiększenie nacisków (ciśnienia) w styku powinno obniżyć odporność suwakowej pary hydraulicznej na wystąpienie zacierania adhezyjnego (sczepiania), ponieważ zwiększenie nacisku podwyższa intensywność ścierania tlenków metalu [1,4,5,15,16,18]. Ze wzrostem nacisków następuje aktywizacja metalu, co wpływa w zasadniczy sposób na zwiększenie grubości powstających tlenków metalu i błonek ochronnych. Jednak wystąpienie sczepienia współpracujących powierzchni zależy nie tyle od grubości co od powierzchni zajmowanej przez tlenki metalu i błonki ochronne (substancje powierzchniowo aktywne) [15,16,18]. Zwiększenie prędkości poślizgu, niewątpliwie intensyfikuje zarówno proces ścierania, jak również odtworzenia się tlenków metalu. Wartość prędkości poślizgu zależy od wielkości amplitudy przesunięcia i częstotliwości wibracji. Jednak zwiększenie prędkości poślizgu kosztem wzrostu amplitudy przesunięcia jest ograniczone. Ograniczenie to jest określane stosunkiem amplitudy przemieszczeń wibracyjnych do wielkości powierzchni kontaktu w kierunku przemieszczeń względnych. Praktycznie zacieranie adhezyjne (sczepianie) w suwakowej parze hydraulicznej przy wibracyjnym poślizgu nie wystąpi, gdy stosunek amplitudy przemieszczenia i wielkości styku powierzchni kontaktu w kierunku ruchu będzie większy od jedności [14,15,16].

4. Modelowanie procesu wywołującego zacieranie adhezyjne w suwakowej parze hydraulicznej przy jej obciążeniu kontaktowo-wibracyjnym

Przy opisie procesów wywołujących zacieranie adhezyjne (sczepianie) na lokalnym styku elementów suwakowej pary hydraulicznej przy wibracyjnym poślizgu należy uwzględnić opóźnienie procesu odtworzenia tlenków metalu na odkrywanych powierzchniach metalicznych (powierzchniach czystych). Wymienione opóźnienie wynika z faktu, że proces utleniania przebiega w czasie niezależnie od szybkości odtworzenia tlenków metalu na powierzchniach czystych. Proces utleniania zależy od zdolności wnikania aktywnego tlenu zawartego w cieczy roboczej do odkrywanych metalicznych obszarów powierzchni elementów pary hydraulicznej (powierzchni czystych) [4,5,15,16,18]. W związku z tym model procesu wywołującego zacieranie adhezyjne w suwakowej parze hydraulicznej przy obciążeniu kontaktowo – wibracyjnym powinien zawierać opóźnienia $t - \tau$.

Prędkość tworzenia na powierzchni tarcia tlenków metalu zależy od prędkości poślizgu i wielkości powierzchni, na której możliwe jest ich utworzenie, tj. powierzchni czystej, zaś nie zależy od wielkości nacisku normalnego (ciśnienia) na styku tarciovym. Grubość tworzących się tlenków metalu nie wpływa na właściwości ochronne powierzchni tarcia tj. jakkolwiek grubość miałyby tlenki metalu i błonki adsorbowane, ich istnienie na odcinku styku zapobiega sczepianiu. Wystąpienie zacierania adhezyjnego (sczepiania) zależy więc od powierzchni styku zajmowanej przez tlenki metalu, a nie od jej grubości. Wychodząc z powyższych ustaleń model procesu wywołującego zacieranie adhezyjne w suwakowej parze hydraulicznej przy jej obciążeniu kontaktowo-wibracyjnym można przedstawić w postaci schematu zaprezentowanego na rys. 5.



Rys. 5. Schemat modelu procesu wywołującego zużycie adhezyjne w suwakowej parze hydraulicznej przy jej obciążeniu kontaktowo – wibracyjnym

f_1 - funkcja wyrażająca zależność prędkości tworzenia się tlenków metalu i błonek adsorbowanych od właściwego parametru, f_2 - funkcja wyrażająca zależność prędkości ścierania tlenków metalu i błonek adsorbowanych od właściwego parametru, S_F - powierzchnia faktycznego kontaktu elementów pary hydraulicznej, praktycznie nie zmieniająca się do wystąpienia zjawiska adhezji (szczepiania), S_p - powierzchnia styku pokryta tlenkami metalu, S_{cz} - powierzchnia czysta (bez tlenków metalu na powierzchni tarcia), v_t - prędkość ścierania tlenków metalu (zmniejszenie zajmowanej przez nie powierzchni w jednostce czasu), v_s - prędkość tworzenia się tlenków metalu (zwiększenie zajmowanej przez nie powierzchni w jednostce czasu), $q(t)$ - parametr obciążenia, określany wartościami normalnego nacisku (ciśnienia) w styku skojarzonych powierzchni pary i prędkości poślizgu, $v(t)$ - prędkość względnego poślizgu skojarzonych powierzchni, τ - czas między pojawieniem się powierzchni czystej i utworzeniem się warstewki tlenków metalu na tych powierzchniach.

Rozpatrywany model procesu wywołującego zacieranie adhezyjne w suwakowej parze hydraulicznej przy jej obciążeniu kontaktowo-wibracyjnym odpowiada zależnościom:

$$\frac{dS_p}{dt} = v_s(t) - v_t(t) = v_\Sigma(t), \quad (1)$$

$$v_s(t) = f_1[v(t), S_{cz}(t - \tau)], \quad (2)$$

$$v_t(t) = f_2[q(t)] \quad S_{cz}(t) = S_F - S_p(t). \quad (3)$$

Szybkość tworzenia się tlenków metalu na powierzchni tarcia jest proporcjonalna do prędkości poślizgu i powierzchni czystej (bez tlenków). Prędkość tworzenia się tlenków metalu na powierzchni tarcia może być zapisana w postaci:

$$v_s(t) = k v(t) S_{cz}(t - \tau), \quad (4)$$

gdzie: k - współczynnik charakteryzujący intensywność tworzenia się tlenków metalu na powierzchni czystej (bez tlenków).

Uwzględniając niezależność oddziaływań normalnego ciśnienia w styku skojarzonych powierzchni $p(t)$ i prędkość względnego poślizgu skojarzonych powierzchni $v(t)$ szybkość niszczenia tlenków metalu na powierzchni tarcia można opisać zależnością:

$$v_t[q(t)] = a_1 v(t) + a_2 p(t), \quad (5)$$

gdzie: a_1, a_2 - współczynniki charakteryzujące właściwości wytrzymałościowe tlenków metalu, $p(t)$ - ciśnienie w styku skojarzonych powierzchni pary.

Kinetykę ścierania z powierzchni elementów pary hydraulicznej i odtwarzanie się tlenków metalu na powierzchni czystej można opisać równaniem różniczkowym:

$$\frac{dS_p}{dt} + k \cdot v(t) \cdot S_p(t - \tau) = v(t)(k \cdot S_F - a_1) - a_2 p(t). \quad (6)$$

Wyrażenie (6) przedstawia liniowe równanie różniczkowe z argumentem opóźniającym. Wyrażenie (6) może być zapisane w postaci ogólnej:

$$\frac{dS_p}{dt} + \Psi(t)S_p(t - \tau) = Q(t), \quad (7)$$

gdzie: $\Psi(t) = k \cdot v(t)$ i $Q(t) = v(t)(k \cdot S_F - a_1) - a_2 p(t)$.

Rozwiązanie równania (7) ma postać:

$$S_p = \left[\int Q(t) e^{\int \Psi(t) dt} dt + C \right] \exp^{-\int \Psi(t) dt}. \quad (8)$$

Z analizy wyrażenia (6) wynika, że:

- 1) wystąpienie zacierania adhezyjnego (sczepianie) jest możliwe przy dowolnych poziomach oddziaływań normalnego ciśnienia w styku skojarzonych powierzchni p, jeżeli prędkość względnego poślizgu skojarzonych powierzchni $v > 0$. Jednak w realnych warunkach niezbędne jest uwzględnienie ograniczenia normalnego ciśnienia w styku $p > p_{\min}$, gdzie p_{\min} jest naciskiem (ciśnieniem) minimalnym;
- 2) czas do wystąpienia zacierania adhezyjnego (sczepiania) zależy głównie od stałych zawierających prędkość ścierania i odtwarzania się tlenków metalu na powierzchni czystej;
- 3) do rozwiązania równania różniczkowego opisującego proces ścierania i odtwarzania tlenków metalu w styku tarciovym należy określić wartość współczynników k, a_1, a_2 . Współczynniki te charakteryzują intensywność odtwarzania i opór ścierania tlenków metalu oraz czas pojawiania się powierzchni czystej i odtwarzania się warstewki tlenków metalu na tej powierzchni. Wartości współczynników k, a_1, a_2 można w przybliżeniu oszacować na podstawie badań eksperymentalnych.

Rozwiązanie równania różniczkowego (6) pozwoli określić rząd granicznych wartości parametrów wibracji i ciśnienia w styku współpracujących powierzchni, wywołujących zacieranie adhezyjne (sczepianie) w suwakowych parach hydraulicznych.

W przypadku, gdy przyjmiemy (warunek ten ma największe praktyczne znaczenia), że $p = \text{const}$ i czas $\tau = \text{const}$ oraz proces ścierania i tworzenia tlenków metalu zachodzi przy zmiennym obciążeniu tj. $v(t) = v_A \sin \omega t$, gdzie v_A jest prędkością poślizgu dla danej amplitudy wibracji, można wydzielić dwa etapy rozpatrywanego procesu. Pierwszy etap, gdy $0 < t \leq \tau$ zaś drugi etap $t > \tau$.

Dla etapu pierwszego tj. $0 < t \leq \tau$ równanie (6) można zapisać:

$$\frac{dS_p}{dt} = (kS_{cz}(0) - a_1) \cdot v_A |\sin \omega t| - a_2 p. \quad (9)$$

Gdy $\Psi(t) = k \cdot v(t) = 0$ równanie (9) przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} S_p &= C - [kS_{cz}(0) - a_1] v_A \int |\sin \omega t| dt - a_2 p \int dt = \\ &= C - [kS_{cz}(0) - a_1] \frac{v_A}{\omega} [|\cos \omega t| - A(\omega t)] - a_2 p t \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie: $C = S_F - S_{cz}(0) + \frac{v_A}{\omega} [kS_{cz}(0) - a_1]$,

$$A(\omega t) = \begin{cases} 2|\cos \omega t|, & \text{gdzy } \frac{n\pi}{\omega} < t < \frac{2n+1}{2} \frac{\pi}{\omega}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \\ 0, & \text{dla innych } t \end{cases}$$

Zmiana powierzchni styku pokrytej tlenkami metalu w pierwszym etapie tj. $0 < t \leq \tau$ można ostatecznie zapisać w postaci:

$$S_p = S_F - S_{cz}(0) + \frac{v_A}{\omega} [kS_{cz}(0) - a_1] \{1 - [|\cos \omega t| - A(\omega t)]\} - a_2 p t, \quad (11)$$

przy czym $1 - [|\cos \omega t| - A(\omega t)] \geq 0$.

Z wyrażenia (11) wynika, że w pierwszym etapie, gdy $0 < t \leq \tau$ zmniejsza się powierzchnia pokryta tlenkami metalu, zaś wzrasta powierzchnia bez tlenków metalu, przy czym prędkość ubywania powierzchni pokrytej tlenkami zależy od ciśnienia normalnego w styku skojarzonych powierzchni. Zmniejszanie się powierzchni pokrytej tlenkami metalu ma charakter oscylacyjny. Wielkość oscylacji zależy od zmiany prędkości ślizgania skojarzonych powierzchni.

Dla etapu drugiego tj. $t > \tau$ równanie (6) można zapisać:

$$\frac{dS_p}{dt} + k \cdot v_A |\sin \omega t| \cdot S_p(t - \tau) = v_A |\sin \omega t| (k \cdot S_F - a_1) - a_2 p(t). \quad (12)$$

Rozwiązanie równania (12) ma postać:

$$\begin{aligned} S_p &= S_F - \frac{a_1}{k} - a_2 p e^{\frac{k v_A}{\omega} [|\cos \omega(t-\tau)| - A(\omega(t-\tau))]} \int e^{-\frac{k v_A}{\omega} [|\cos \omega(t-\tau)| - A(\omega(t-\tau))]} d(t - \tau) + C e^{\frac{k v_A}{\omega} [|\cos \omega(t-\tau)| - A(\omega(t-\tau))]} = \\ &= S_F - \frac{a_1}{k} - \left[a_2 p \int e^{\frac{k v_A}{\omega} [|\cos \omega(t-\tau)| - A(\omega(t-\tau))]} d(t - \tau) - C \right] e^{\frac{k v_A}{\omega} [|\cos \omega(t-\tau)| - A(\omega(t-\tau))]} \end{aligned}$$

Ostatecznie rozwiązanie równania (12) przyjmuje postać:

$$S_p = S_F - \frac{a_1}{k} - [a_2 p B - C] e^{\frac{k v_A}{\omega} [|\cos \omega(t-\tau)| - A(\omega(t-\tau))]}, \quad (13)$$

gdzie: $B = \int e^{\frac{k v_A}{\omega} [|\cos \omega(t-\tau)| - A(\omega(t-\tau))]} d(t - \tau)$.

5. Analityczne szacowanie współczynników a_1, a_2, k modelu

Do rozwiązania równania różniczkowego opisującego proces ścierania i odtwarzania tlenków metalu w styku tarciovym (6) należy określić wartość współczynników a_1, a_2, k .

Objętość tlenków metalu ścierana z powierzchni elementu suwakowej pary hydraulicznej przy zadanych parametrach obciążenia można zapisać w postaci $V = h \cdot S$, gdzie h jest średnią grubością warstwy tlenków a S powierzchnią skojarzonego styku.

Zakładając, że zależność szybkości usuwania tlenków metalu od szybkości wzajemnego ruchu elementów pary hydraulicznej i ciśnienia kontaktowego jest liniowa można zapisać:

$$d\dot{S} = \frac{\partial \dot{S}}{\partial v} dv + \frac{\partial \dot{S}}{\partial p} dp, \quad (14)$$

gdzie: $\frac{\partial \dot{S}}{\partial v} = a_1$ jest współczynnikiem wyrażającym intensywność usuwania tlenków metalu z powierzchni elementu pary hydraulicznej od prędkości ślizgania,

$\frac{\partial \dot{S}}{\partial p} = a_2$ jest współczynnikiem wyrażającym intensywność usuwania tlenków metali z powierzchni elementu pary hydraulicznej od wielkości ciśnienia kontaktowego.

Objętość tlenków metalu ścierana z powierzchni elementu suwakowej pary hydraulicznej przy zadanych parametrach obciążenia można przedstawić w postaci:

$$d\dot{V} = h \frac{\partial \dot{S}}{\partial v} dv + h \frac{\partial \dot{S}}{\partial p} dp \quad \text{lub} \quad d\dot{V} = ha_1 dv + ha_2 dp. \quad (15)$$

Z zależności (15) można wyznaczyć współczynniki a_1 i a_2 :

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{h} \frac{\partial \dot{V}}{\partial v} - a_2 \frac{\partial p}{\partial v} = \frac{1}{h} \frac{\dot{V}_2 - \dot{V}_1}{v_2 - v_1} - a_2 \frac{p_2 - p_1}{v_2 - v_1}; \\ a_2 = \frac{1}{h} \frac{\partial \dot{V}}{\partial p} - a_1 \frac{\partial v}{\partial p} = \frac{1}{h} \frac{\dot{V}_2 - \dot{V}_1}{p_2 - p_1} - a_1 \frac{v_2 - v_1}{p_2 - p_1}. \end{cases} \quad (16)$$

Współczynnik k wyrażający zależność szybkości tworzenia się tlenków metalu (zwiększenie zajmowanej przez nie powierzchni w jednostce czasu) od prędkości poślizgu (przy założeniu, że $v_t = v_s$) można określić z zależności:

$$a_1 v_1 + a_2 p_{sr} = k v_1 S_{cz}. \quad (17)$$

Z zależności (17) wyznaczamy współczynnik k o postaci:

$$k = \frac{a_1 v_1 + a_2 p_{sr}}{v_1 S_{cz}}. \quad (18)$$

Ciśnienie kontaktowe w suwakowej parze hydraulicznej przy zadanych parametrach obciążenia ma postać $p = \frac{P}{S}$, gdzie P jest obciążeniem a S płaszczyzną kontaktu. Wychodząc z powyższej zależności średnie ciśnienie kontaktowe można przedstawić w postaci:

$$p_{sr} = \frac{1}{S_2 - S_1} \int_{S_1}^{S_2} \frac{P}{S} dS = \frac{P}{S_2 - S_1} \ln \frac{S_2}{S_1}, \quad (19)$$

gdzie: S_1 i S_2 to początkowa i końcowa płaszczyzna kontaktu elementów pary hydraulicznej.

Objętość tlenków metalu ścierana z powierzchni elementu suwakowej pary hydraulicznej przy zadanych parametrach obciążenia ma postać $V_c = V_{c2} - V_{c1}$, gdzie V_{c1} i V_{c2} to objętości tlenków metalu przed i po obciążeniu. Stąd objętość tlenków metalu ścierana z powierzchni cylindrycznej suwakowej pary hydraulicznej przy zadanych parametrach obciążenia ma postać:

$$V_c = \frac{\pi d^4}{192 R^2} \left(3R - \frac{d^2}{8R} \right), \quad (20)$$

gdzie: d jest średnicą obszaru zużycia, zaś R promieniem zastępczym.

Jako przykład może posłużyć szacowanie współczynników a_1, a_2, k dla ogranicznika narastania ciśnienia, w którym elementy suwakowej pary hydraulicznej wykonane są ze stali chromowej HWG o twardości HRC= 58. Ogranicznik narastania ciśnienia ma następujące dane geometryczne: promień zastępczy $R = 6$ mm, skok $l_A = 0,3$ mm.

Przykład szacowania współczynnika a_2

Dla częstotliwości $f = 60$ Hz prędkość przemieszczania się suwaka wynosi $v = 4 \cdot l_A \cdot f = 4 \cdot 0,3 \cdot 60 = 72 \text{ mm/s}$. Z badań na stanowisku imitującym wibracyjny charakter przemieszczania elementów suwakowej pary hydraulicznej pod działaniem pulsacji ciśnienia cieczy roboczej dla $P_1 = 14,7$ N i $f = 60$ Hz w czasie $t = 30$ min uzyskano:

$$\begin{aligned} d_1 &= 0,14 \text{ mm}, & h_1 &= 0,41 \cdot 10^{-3} \text{ mm}, & V_{c1} &= 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3, \\ d_2 &= 0,25 \text{ mm}, & h_2 &= 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ mm}, & V_{c2} &= 31,8 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3. \end{aligned}$$

a dla $P_2 = 98,1 \text{ N}$

$$\begin{aligned} d_1 &= 0,25 \text{ mm}, & h_1 &= 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ mm}, & V_{c1} &= 31,8 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3, \\ d_2 &= 0,41 \text{ mm}, & h_2 &= 3,79 \cdot 10^{-3} \text{ mm}, & V_{c2} &= 256 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3. \end{aligned}$$

Objętość tlenków metalu ścierana z powierzchni elementu suwakowej pary hydraulicznej dla $P_1 = 14,7 \text{ N}$ i $P_2 = 98,1 \text{ N}$ wynosi:

$$V_{P_1} = V_{c2} - V_{c1} = (31,8 - 3,3) \cdot 10^{-6} = 28,5 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3,$$

$$V_{P_2} = V_{c2} - V_{c1} = (256 - 31,8) \cdot 10^{-6} = 224 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3.$$

Szybkość zużycia objętości V_{P_1} i V_{P_2} dla $P_1 = 14,7 \text{ N}$ i $P_2 = 98,1 \text{ N}$ wynosi:

$$v_{P_1} = \frac{V_{P_1}}{t} = \frac{28,5 \cdot 10^{-6}}{1800} = 1,6 \cdot 10^{-9} \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}, \quad v_{P_2} = \frac{V_{P_2}}{t} = \frac{224 \cdot 10^{-6}}{1800} = 124 \cdot 10^{-9} \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}.$$

Początkowa i końcowa powierzchnia kontaktu elementów pary hydraulicznej dla $P_1 = 14,7 \text{ N}$ i $P_2 = 98,1 \text{ N}$ wynoszą:

$$S_{1P_1} = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,14^2}{4} = 0,015 \text{ mm}^2; \quad S_{2P_1} = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,25^2}{4} = 0,049 \text{ mm}^2;$$

$$S_{1P_2} = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,26^2}{4} = 0,053 \text{ mm}^2; \quad S_{2P_2} = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,41^2}{4} = 0,132 \text{ mm}^2.$$

Średnie ciśnienie kontaktowe dla $P_1 = 14,7 \text{ N}$ i $P_2 = 98,1 \text{ N}$ wynosi:

$$p_{sr1} = \frac{P_1}{S_{2P_1} - S_{1P_1}} \ln \frac{S_{2P_1}}{S_{1P_1}} = \frac{14,7}{0,049 - 0,015} \ln \frac{0,049}{0,015} = 512 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$$p_{sr2} = \frac{P_2}{S_{2P_2} - S_{1P_2}} \ln \frac{S_{2P_2}}{S_{1P_2}} = \frac{98,1}{0,132 - 0,053} \ln \frac{0,132}{0,053} = 1133 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

Współczynnik a_2 wynosi:

$$a_2 = \frac{1}{h} \frac{v_{P_2} - v_{P_1}}{p_{sr2} - p_{sr1}} = \frac{1}{25 \cdot 10^{-6}} \frac{(124 - 1,6) \cdot 10^{-9}}{1133 - 512} = 0,19 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mm}^4}{\text{N} \cdot \text{s}}$$

Przykład szacowania współczynnika a_1

Dla częstotliwości $f_1 = 20 \text{ Hz}$ $v_1 = 4 \cdot l_A \cdot f_1 = 4 \cdot 0,3 \cdot 20 = 24 \text{ mm/s}$ a dla częstotliwości $f_2 = 60 \text{ Hz}$ $v_2 = 4 \cdot l_A \cdot f_2 = 4 \cdot 0,3 \cdot 60 = 72 \text{ mm/s}$. Z badań dla $P_1 = 14,7 \text{ N}$ i $v_1 = 24 \text{ mm/s}$ uzyskano:

$$\begin{aligned} d_1 &= 0,14 \text{ mm}, & h_1 &= 0,41 \cdot 10^{-3} \text{ mm}, & V_{c1} &= 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3, \\ d_2 &= 0,18 \text{ mm}, & h_2 &= 0,83 \cdot 10^{-3} \text{ mm}, & V_{c2} &= 12,9 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3, \end{aligned}$$

Z badań dla $P_1 = 14,7 \text{ N}$ i $v_2 = 72 \text{ mm/s}$ uzyskano:

$$\begin{aligned} d_1 &= 0,14 \text{ mm}, & h_1 &= 0,41 \cdot 10^{-3} \text{ mm}, & V_{c1} &= 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3, \\ d_2 &= 0,25 \text{ mm}, & h_2 &= 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ mm}, & V_{c2} &= 31,8 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3. \end{aligned}$$

Objętość tlenków metalu ścierana z powierzchni elementu suwakowej pary hydraulicznej dla $v_1 = 24 \text{ mm/s}$ i $v_2 = 72 \text{ mm/s}$ wynosi:

$$V_{v_1} = V_{c2} - V_{c1} = (12,9 - 3,3) \cdot 10^{-6} = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3,$$

$$V_{v_2} = V_{c2} - V_{c1} = (31,8 - 3,3) \cdot 10^{-6} = 28,5 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3.$$

Szybkość zużycia objętości V_{v_1} i V_{v_2} dla $P_1 = 14,7 \text{ N}$ wynosi:

$$v_{v_1} = \frac{V_{v_1}}{t} = \frac{9,6 \cdot 10^{-6}}{1800} = 5,3 \cdot 10^{-9} \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}, \quad v_{2v_2} = \frac{V_{P_2}}{t} = \frac{28,5 \cdot 10^{-6}}{1800} = 15,8 \cdot 10^{-9} \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}.$$

Początkowa i końcowa powierzchnia kontaktu elementów pary hydraulicznej dla $v_1 = 24 \text{ mm/s}$ i $v_2 = 72$ wynoszą:

$$S_1 = \frac{\pi(d_2 - d_1)^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,18 - 0,14)^2}{4} = 0,016 \text{ mm}^2;$$

$$S_{2v_1} = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,18^2}{4} = 0,025 \text{ mm}^2; \quad S_{2v_2} = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,25^2}{4} = 0,049 \text{ mm}^2.$$

Średnie ciśnienie kontaktowe dla $v_1 = 24 \text{ mm/s}$ i $v_2 = 72$ wynosi:

$$p_{sr1} = \frac{P_1}{S_{2v_1} - S_1} \ln \frac{S_{2v_1}}{S_1} = \frac{14,7}{0,025 - 0,016} \ln \frac{0,025}{0,016} = 729 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

$$p_{sr2} = \frac{P_1}{S_{2v_2} - S_1} \ln \frac{S_{2v_2}}{S_1} = \frac{14,7}{0,049 - 0,016} \ln \frac{0,049}{0,016} = 498 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

Współczynnik a_1 wynosi:

$$a_1 = \frac{1}{v_2 - v_1} \left[\frac{v_{v_2} - v_{v_1}}{h} - a_2 (p_{sr1} - p_{sr2}) \right] =$$

$$= \frac{1}{72 - 24} \left[\frac{(15,8 - 5,3) \cdot 10^{-9}}{30 \cdot 10^{-6}} - 0,24 \cdot 10^{-3} (498 - 729) \right] = 12,7 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

Przykład szacowania współczynnika k

Współczynnik k wyznaczamy z zależności (18). Należy przyjąć, że powierzchnia czysta (bez tlenków metalu na powierzchni tarcia) S_{cz} stanowi 30% powierzchni faktycznego kontaktu elementów pary hydraulicznej S_F tj. $S_{cz} = 0,3 S_F$ [14,16]. Powierzchnie faktycznego kontaktu elementów pary hydraulicznej S_F wyznaczmy z zależności [13]:

$$S_F = \pi \left(\frac{3}{4} \kappa R P \right)^{\frac{2}{3}}$$

gdzie: $\kappa = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$ a E_1, E_2, ν_1, ν_2 to współczynniki materiałowe i Poissona. Dla stali chromowej HWG $\kappa = 0,858 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{N}$.

Dla stali chromowej HWG przy $R = 6 \text{ mm}$ $S_F = \pi \left(\frac{3}{4} \cdot 0,858 \cdot 10^{-4} \cdot 6 \cdot 98,1 \right)^{\frac{2}{3}} = 0,055 \text{ mm}^2$.

Powierzchnia czysta (bez tlenków metalu na powierzchni tarcia) $S_{cz} = 0,3 S_F = 0,3 \cdot 0,055 = 0,0165 \text{ mm}^2$.

$$\text{Współczynnik } k = \frac{a_1 v_1 + a_2 p_{sr}}{v_1 S_{cz}} = \frac{12,7 \cdot 10^{-6} \cdot 24 + 0,24 \cdot 10^{-3} \cdot 961}{24 \cdot 0,0165} = 0,63 \text{ mm}^{-1}$$

6. Podsumowanie

Warunkiem wystąpienia procesu zacierania adhezyjnego (szczepiania) w suwakowej parze hydraulicznej urządzenia regulacyjnego jest jej obciążenie kontaktowo-wibracyjne. Głównym czynnikiem powodującym wystąpienie zacierania adhezyjnego (szczepiania) jest szybkość ścierania tj. tworzenia czystych powierzchni pozbawionych warstewki tlenków metalu i odtwarzania tlenków metalu na współpracujących powierzchniach pary suwakowej.

Szybkość ścierania i odtwarzania tlenków metalu na współpracujących powierzchniach pary suwakowej zależy od wartości parametrów wibracji i ciśnienia w styku współpracujących powierzchni pary hydraulicznej. Tworzenie się powierzchni czystych (bez tlenków metalu) jest możliwe tylko przy określonym skojarzeniu prędkości ścierania i odtwarzania tlenków oraz absorbowanych na powierzchni błonek olejowych. Gdy szybkość tworzenia warstewek tlenków metalu na współpracujących powierzchniach suwakowej pary hydraulicznej jest mniejsza od szybkości ich ścierania rozpoczyna się proces zacierania adhezyjnego (sczepiania).

Zaproponowany analityczny opis ścierania i odtwarzania tlenków metalu w styku tarciovym pozwala przeprowadzić zarówno jakościową, jak i ilościową analizę wpływu parametrów wibracji i obciążenia na wystąpienie zacierania adhezyjnego (sczepiania) w suwakowych parach hydraulicznych urządzeń regulacyjnych. Do rozwiązania równania różniczkowego opisującego proces ścierania i odtwarzania tlenków metalu w styku tarciovym należy określić wartość współczynników k, a_1, a_2 . Współczynniki te charakteryzują intensywność odtwarzania i opór ścierania tlenków metalu oraz czas pojawiania się powierzchni czystej i odtwarzania się warstewki tlenków metalu na tej powierzchni. Wartości współczynników k, a_1, a_2 można w przybliżeniu oszacować na podstawie badań eksperymentalnych. Podczas badań należy oszacować prędkość ścierania tlenków metalu oraz ich odtwarzania na powierzchniach czystych przy różnych wartościach prędkości poślizgu i nacisku (ciśnieniu) w styku tarciovym oraz odporność na zużycie stali w warunkach tarcia granicznego. Wpływ prędkości poślizgu i obciążenia można oszacować na drodze badania próbek w warunkach zbliżonych do warunków powstawania zacierania adhezyjnego (sczepiania), gdy występuje jeszcze zużycie utleniające.

Zaproponowany model procesu wywołującego zacieranie adhezyjne w suwakowej parze hydraulicznej przy jej obciążeniu wibracyjnym pozwala określić rząd granicznych wartości wibracji i ciśnienia w styku współpracujących powierzchni, po przekroczeniu których występuje zużycie adhezyjne w tej parze.

Literatura

1. Bushan B. Introduction to Tribology. John Wiley & Sons, New York 2002.
2. Chenxiao N, Xushe Z. Study on vibration and noise for the hydraulic system of hydraulic hoist. Proceedings of 2012 International Conference on Mechanical Engineering and Material Science. MEM 2012;126-128.
3. Choi S H, Jin Y S. Evaluation of stored energy in cold-rolled steels from EBSD data. Materials Science & Engineering 2004; A371: 149-159
4. Eyre T S, Scott D. Wear Resistance of Metals. Akademic Pres, New York 1977.
5. Gierek A. Zużycie tribologiczne. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
6. Grinis L, Haslavsky V, Tzadka U. Self-excited vibration in hydraulic ball check valve. World Academy of Science Engineering and Technology 2012; 6: 1041-1046.
7. Gryboś R. Drgania konstrukcji wzbudzonej przepływem. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
8. Harris C M, Piersol A G. Shock and Vibration Handbook. McGraw-Hill, New York, 2002.
9. Ijas M, Virvalo T. Damping of low frequency pressure oscillation. Tampere University of Technology, Tampere 2007.
10. Johnson K L. Mechanics of adhesion. Tribology Int. 1998; 31: 413-418.
11. Крагельский И В, Михин Н М. О влиянии природы твердых тел на внешнее трение и о соотношении между адгезионной и объемной составляющими. Теория трения и износа. Наука 1965: 30-34.

12. Лозовский В Н. Диагностика авиационных топливных и гидравлических агрегатов. Транспорт, Москва 1979.
13. Markov D, Kelly D. Mechanism of adhesion-initiated catastrophic wear: pure sliding. *Wear* 2000; 239: 189-210.
14. Nosal S. Tribologia. Wprowadzenie do zagadnień tarcia, zużywania i smarowania. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
15. Nosal S. Kształtowanie odporności na zacieranie adhezyjne z wykorzystaniem wybranych modeli. *Tribologia* 2015; 3: 121–135.
16. Nosal S, Wojciechowski Ł. Zastosowanie pomiarów swobodnej energii powierzchniowej do oceny odporności na zacieranie adhezyjne. *Eksploatacja i Niezawodność* 2010; 45(1/2010): 83-90.
17. Panda L N, Kac R C. Nonlinear dynamics of a pipe conveying pulsating fluid with combination, principal parametric and internal resonances. *Journal of Sound and Vibration* 2008; 309: 375-406.
18. Sadowski J. Kryterium zacierania adhezyjnego powierzchni metali. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 1980; 3: 247-263.
19. Stosiak M. Vibration insulation of hydraulic system control components. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2011; 11(2): 112-117.
20. Stosiak M. Identyfikacja oddziaływania drgań i metody ich redukcji w wybranych zaworach hydraulicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2015.
21. Ułanowicz L. Badanie procesów destrukcyjnych w lotniczych napędach hydraulicznych w aspekcie ich trwałości. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2013.
22. Ułanowicz L. Wear processes of hydraulic plunger and barrel assemblies connected with the time of their work. *Journal of Kones* 2014; 21(4): 515-524.
23. Zieja M, Ważny M. A model for service life control of selected device systems. *Polish Maritime Research* 2014; 21(2): 45-49.
24. Zieja M, Ważny M, Stępień S. Distribution determination of time of exceeding permissible condition as used to determine lifetimes of selected aeronautical devices/systems. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2016; 18(1): 57-64.

Dr hab. inż. Leszek UŁANOWICZ

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
 ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa, Polska
 E-mail: leszek.ulanowicz@itwl.pl