

MAGDALENA TRZOS\*

## **Tendencje rozwojowe w modelowaniu zjawisk i procesów tribologicznych**

### **Słowa kluczowe**

Modelowanie, obiekty tribologiczne, badania empiryczne, wykorzystanie danych z eksperymentów.

### **Keywords**

Modelling, tribological objects, empirical research, using of experimental data.

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono zagadnienie rozwoju modeli tribologicznych. Scharakteryzowano sposoby klasyfikacji modeli tribologicznych. Systemy informatyczne stanowią istotne narzędzie wspomagające modelowanie obiektów tribologicznych, w artykule zaprezentowano wykorzystanie technik komputerowych w modelowaniu obiektów tribologicznych. Dokonano analizy skali i ograniczeń wykorzystania informacji zawartej w wynikach badań empirycznych, wskazano potrzebę rozwoju metod gromadzenia i porządkowania danych z badań tribologicznych z zastosowaniem systemów komputerowych.

### **1. Modelowanie a wiedza o obiekcie**

Zrozumienie rzeczywistości, np. przebiegu czy następstw zjawisk, działania czy zmiany stanów systemu wymaga często opracowania i realizacji modeli, zaplanowania i wykonania, z ich udziałem, eksperymentów, a następnie na pod-

---

\* ITeE – PIB, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (48) 364 42 41 w. 214, e-mail: magdalena.trzos@itee.radom.pl

stawie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych przeprowadzenie wnioskowania na temat obiektu badań. Pojęcie obiektu odnosi się w prowadzonych rozważaniach do analizowanego wycinka rzeczywistości, tzn. zjawiska, systemu, procesu itp. W konsekwencji przeprowadzonych działań uzyskuje się uzupełnienie poszukiwanej wiedzy o obiekcie lub też wnioskuje o konieczności podjęcia kolejnych badań po zmianie założeń, koncepcji modelu czy zastosowania innej metody badawczej.

Modelowanie jest techniką szeroko stosowaną w procesach wyjaśniania zachowania obiektów oraz ich klasyfikacji, może dotyczyć interpretacji zjawisk, opisu systemów, jak również odgrywa znaczącą rolę w rozwiązywaniu zadań prognostycznych.

Bezpośrednie badanie obiektów dostarcza cennych informacji na temat funkcjonowania obiektu, jego stanów, zmiany parametrów czy wpływu różnych czynników na charakterystyki obiektu. Jednak bezpośredni eksperyment badawczy jest zazwyczaj metodą kosztowną, wymagającą znacznych przedziałów czasowych, w jakich prowadzone są badania, często też znacznego ograniczenia zakresu zmian wymuszeń ze względu na ryzyko uszkodzenia obiektu czy też wymogi bezpieczeństwa. Uogólnienie wniosków wypracowanych na podstawie wyników badań bezpośrednich możliwe jest tylko wtedy, jeśli badaniom poddano wystarczającą liczbę obiektów danej klasy a badania zostały przeprowadzone w porównywalnych warunkach działania obiektu. Warunek ten często nie może być spełniony nie tylko ze względu na koszty i czas badań, ale również ze względu na charakter obiektu, np. jeśli badania są obciążone zbyt dużym ryzykiem lub nie mogą być przeprowadzone ze względów etycznych. Te, jak również wiele innych przyczyn, jak chociażby możliwość prognozowania zachowania się systemów znajdujących się w fazie projektowania, powodują szerokie stosowanie modelowania jako metody z jednej strony dostarczającej informacji na temat zachowania obiektu pod wpływem zadanych wymuszeń, z drugiej zaś pozwalającej na przedstawienie istniejącej wiedzy o obiekcie.

Model nie musi reprezentować całej posiadanej wiedzy na temat przedmiotu badań, jego budowa i działanie powinny przede wszystkim umożliwić dostarczenie brakujących informacji pozwalających na lepsze poznanie obiektu. Dostarczana, w wyniku prowadzonych na modelu badań eksperymentalnych, wiedza o obiekcie może determinować zmiany samego modelu aż do momentu uzyskania wiedzy wystarczającej o obiekcie lub wyczerpania możliwości modelowania. Model może również być opracowany w celu sformalizowania posiadanej wiedzy, powinien wtedy zawrzeć całą posiadaną wiedzę o obiekcie. Niewątpliwą zaletą modelowania jest dostarczenie możliwości wnioskowania o cechach oryginału na podstawie badań modelu, który „nie jest zwykłym odtworzeniem rzeczywistości, ale świadomym jej przetworzeniem, wyrażającym te jej właściwości, które w planowanych badaniach są najistotniejsze” [1]. Z zagadnieniem tego przetworzenia związany jest jeden z głównych problemów modelowania, mianowicie zachowanie podobieństwa między modelem a orygi-

nałem. Spełnienie podobieństwa między obiektem i modelem wymaga zachowania kryteriów podobieństwa zwanych też zmiennymi uogólnionymi i stanowiących bezwymiarowe ilorazy zbudowane z wielkości fizycznych opisujących obiekt. Określenie kryteriów podobieństwa może być dokonane przy wykorzystaniu równań różniczkowych opisujących obiekt lub też w przypadku ich braku przy zastosowaniu analizy wymiarowej. W zależności od analizowanych zagadnień zakres uwzględnianego podobieństwa może być ograniczony np. do podobieństwa: statycznego, kinematycznego, dynamicznego czy termodynamicznego.

W zależności od celu badań od modelu można wymagać np. odtwarzania struktury badanego obiektu, jego reakcji na określone bodźce czy też przedstawienia wybranych cech oryginału celem np. zbadania ich wpływu na zmiany zachowania się obiektu. Tak więc badany obiekt może mieć przypisanych wiele modeli, model zaś może być przedstawiony w różnych formach w zależności od celu modelowania, posiadanej wiedzy na temat obiektu, możliwości badawczych itp. Opracowanie koncepcji modelu stanowi jedno z głównych zagadnień procesu modelowania wpływające istotnie na jakość modelu oraz dostarczanych przez niego informacji i w głównej mierze zależy od umiejętności podejmującego zadanie modelowania. W literaturze przedmiotu [2, 3] podawane są zasady oraz wskazówki, które należy brać pod uwagę przystępując do budowy modelu obiektu, nie można jednak tego procesu sformalizować, a podejmując zadanie modelowania na etapie opracowania koncepcji modelu należy każdorazowo przeprowadzić analizę badanego obiektu pod kątem celu modelowania, przyjęć założenia oraz dokonać wyboru rodzaju modelu.

Naturalną tendencją związaną z poznaniem obiektu jest budowanie modelu opisowego w formie zależności matematycznych, ujmujących wiedzę o obiekcie w związku ilościowe pozwalające na wnioskowanie o zachowaniu się obiektu w różnych warunkach jego funkcjonowania. Przykładowo można tu wymienić modelowanie układów mechanicznych, gdzie w celu przedstawienia stanów nieustalonych wykorzystuje się równania dynamiki. Procedura budowy modelu w tym wypadku wymaga uwzględnienia pewnych fundamentalnych zasad (np. zasad dynamiki) oraz ogólnie przyjętych założeń, np. że pewne elementy obiektu są nieodkształcalne, inne z kolei nieważkie. Jednak każde z tych założeń musi być dokładnie rozważone i zweryfikowane, tak aby budowany model stanowił wystarczające przybliżenie obiektu. Zapisana w formie matematycznej wiedza o obiekcie stanowi zbiór równań algebraicznych i różniczkowych. W przypadku niezbyt skomplikowanych zależności rozwiązanie można uzyskać na drodze analitycznej. Jednak w zdecydowanej większości przypadków opisy zawierają złożone elementy nieliniowe i w celu znalezienia rozwiązania, a więc przebiegu zmiennych wyjściowych w funkcji zmiennych niezależnych stosuje się metody numeryczne. Rozwój metod komputerowych dostarcza narzędzi umożliwiających sprawną realizację zadań rozwiązywania modelu matematycznego, a więc dostarczania informacji na temat reakcji modelowanego obiektu na zadane wymuszenia.

## 2. Rozwój modeli tribologicznych

W rozwoju wiedzy tribologicznej zdecydowaną dominację przejawiają metody indukcyjne stosowane przez badaczy w celu rozwiązania problemów naukowych i aplikacyjnych. Źródłem wiedzy i podstawą tworzenia modeli opisowych zmierzających do przedstawienia obserwowanych zależności są głównie wyniki badań empirycznych, przeprowadzenie których wymaga z kolei opracowania modeli pozwalających na wyznaczenie interesujących badacza relacji wyjaśniających analizowane aspekty zjawiska tarcia czy też towarzyszącego mu procesu zużywania.

Pomimo znacznego zainteresowania badaczy rozwiązaniem problemów tribologicznych, prowadzonych w szerokim zakresie badań dostarczających obszernej bazy wyników doświadczalnych, nie wypracowano teorii tarcia, dlatego też jej funkcje wypełniane są przez modele interpretacyjne budowane na bazie wyników dostarczanych przez modele fizyczne.

Pierwsze modele tarcia odnosiły się do zjawiska jako całości, a ich celem było wyjaśnienie podstawowego atrybutu tarcia, czyli oporów ruchu. Kolejny etap rozwoju modeli tarcia związany był z ilościowym ujęciem zależności określających siłę tarcia, np. modele Amontonsa, Epifanowa, Deriagina, Stribecka oraz opisujące współczynnik tarcia modele: Eulera, Ernsa-Merchanta, Bowdena, Tomlinsona. Rozwój modeli związany był z podejmowanymi próbami wyjaśniania oporów ruchu, powstającymi w obszarze styku odkształceniami, powstawaniem i zrywaniem złącz adhezyjnych, analizowaniem wpływu tarcia wewnętrznego i chropowatości powierzchni. W miarę rozwoju wiedzy podejmowano szczegółowe zagadnienia w modelowaniu tarcia, uwzględniając zjawiska towarzyszące tarcu. Rozwój aparatury badawczej pozwolił na podejmowanie zaawansowanych badań np. w skali atomowej czy wysokiej próżni.

Badania lat 50. i 60. XX w. przyniosły rozwój koncepcji: zużywania ślizgowego, ściernego, erozji i frettingu. Znaczący wkład w budowę podstaw zrozumienia tych zagadnień wnieśli: Holm, Archard, Waterhouse, Buckley, Kragielski, Greenwood, Bowden, Tabor oraz wielu innych. W tym okresie powstały koncepcje zużywania uwzględniające między innymi: adhezję, powierzchnię rzeczywistego styku, kąta natarcia cząstek, styku powierzchni chropowatych. Kolejne lata przyniosły wzrost zainteresowania dynamiką tribosystemów.

Analizując rozwój modeli zużywania począwszy od lat 40. XX wieku można zaobserwować trzy główne etapy modelowania [4]. Do 1970 roku najbardziej powszechne były równania empiryczne, opracowywane na podstawie wyników uzyskanych z testów. W 1970 roku Rhee [5] zaobserwował, badając zużycie polimerów, że zużycie materiałów podlegających tarcu jest funkcją obciążenia  $F$ , prędkości  $v$  i czasu  $t$ . Zaproponował wzór:  $\Delta W = KF^a V^b t^c$ , gdzie:  $\Delta W$  jest wagą zużytego (na skutek tarcia) materiału,  $K$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  są stałymi empirycznymi. Równania typu iloczynu wybranych zmiennych są bardzo powszechnie stosowane w formalnym przedstawieniu zużycia. Zależności określone na bazie wy-

ników empirycznych, chociaż z jednej strony zachowują ważność tylko dla ściśle określonych warunków, w których zostały uzyskane, to mają znaczenie praktyczne, ponieważ o wiele dokładniej przedstawiają zależności, obowiązujące w tych warunkach, od ogólnych modeli teoretycznych.

W latach 1970–1980 rozwijano modelowanie w oparciu o styk mechaniczny. Modele tego typu opracowywano przy założeniu prostych zależności pomiędzy parametrami pracy. Wiele z nich uwzględnia parametry topograficzne dla określenia lokalnych obszarów styku. Uwzględniają również parametry materiałowe, najczęściej moduł Younga, jako istotnie wpływające na proces zużywania. Wśród modeli tego typu najpowszechniej stosowanym jest model Archarda [6].

Okres począwszy od lat 80. to poszukiwanie modeli bazujących na mechanizmie uszkodzeń materiału. Pojawia się pogląd, że odporność na zużycie nie jest własnością wewnętrzną materiału, a wybór określonych własności mechanicznych np. dla obliczenia powierzchni rzeczywistego styku może być mało zasadny. Studia nad mechanizmem uszkodzeń materiału w wyniku tarcia rozpatrują: dyslokacje, analizę linii poślizgu, właściwości zmęczeniowe, właściwości kruchego pęknięcia [7–9]. Zauważana jest również rola utleniania w procesie zużywania [10].

H.C Meng i K.C. Ludema [11] zwracają uwagę na znaczą liczbę zmiennych uwzględnianych w modelach, jak również na to, że różni autorzy włączają różne macierze zmiennych, często nawet dla tego samego systemu. Liczba proponowanych w opisach zmiennych wzrasta w czasie wobec jednoczesnego braku podobieństwa w podejściu do modelowania zużycia. Praktyczną konsekwencją tego stanu są trudności wykorzystania przez projektantów (konstruktorów) zgromadzonego zasobu wyników badań.

Ciekawą propozycję połączonego modelu dla mikroprzesunięć bazującego na opracowanych wcześniej znanych modelach zaproponowano w artykule [12]. Struktura modelu zbudowana jest z komponentów pozwalających na reprezentację różnych sytuacji tarciovych.

### 3. Klasyfikacje modeli tribologicznych

Dokonując ewidencji modeli tarcia, należy wymienić dwa istotne kryteria klasyfikacyjne: jedno z nich dotyczy względnej prędkości ruchu stykających się ciał, drugie zastosowanego sposobu rozdzielania elementów węzła tarciovego uwzględniającego smarowanie.

Zgodnie z pierwszym kryterium wyróżnia się tarcie spoczynkowe oraz ruchowe.

Rodzaje tarcia wydzielone ze względu na kryterium określające sposób smarowania to: tarcie płynne, graniczne i mieszane.

Inny sposób klasyfikacji modeli tarcia zgodnie z typami wyjaśnienia zacytowanymi w monografii [13], uwzględnia: modele atrybutywne, genetyczne

i strukturalne. Modele atrybutywne opisują związek obiektu z określonym atrybutem. Atrybut jest rozumiany jako właściwość, bez której obiekt nie może istnieć. Atrybutywne modele tarcia dotyczą głównie wyjaśniania oporów ruchu. Do tej grupy można zaliczyć pierwsze modele tarcia: model Leonarda da Vinci, Amontonsa, Eulera czy też współcześnie opracowany model W. Rakowskiego [14] wiążący opory ruchu z tarciem kinetycznym zewnętrznym. Modele genetyczne opisują związek obiektu z poprzedzającymi go w czasie innymi obiektami lub innymi stanami tego samego obiektu. Do tej grupy modeli tribologicznych można zaliczyć chociażby opisy powstawania połączeń elementów współpracujących tarciowo. Modele strukturalne opisują elementy obiektu i sposób ich połączenia w jedną całość bądź też ustalają miejsce obiektu w jakimś większym układzie. Próby wyjaśniania strukturalnego w tribologii dotyczą głównie modeli opisujących powierzchnię elementów styku tarciowego oraz modele węzłów kinematycznych.

Modelowanie zużywania, jako jednej z form dyssypacji energii towarzyszącej tarcia w głównej mierze odpowiedzialne za uszkodzenia maszyn i urządzeń stanowi ważne zagadnienie badań tribologicznych. Badania zużywania zmierzają głównie do identyfikacji mechanizmów niszczenia najbardziej prawdopodobnych w określonych warunkach pracy węzła tarciowego oraz poszukiwania metod umożliwiających sterowanie tymi procesami poprzez np. zastosowanie odpowiednich sposobów smarowania.

Wśród kryteriów klasyfikacji zużywania najczęściej stosowane jest kryterium wiodącego mechanizmu zużywania. A. Mängee [15] wymienia pięć głównych typów zużycia tribologicznego: zużycie przez adhezję, zużycie tribochemiczne, zużycie zmęczeniowe, zużycie ściernie, erozję.

W opisach zużywania adhezyjnego podaje się, że zachodzi ono przy niedostatecznym smarowaniu albo jego braku, przy niezbyt wysokich prędkościach i dużych naciskach. Do tego rodzaju zużywania należy zaliczyć fretting zachodzący w nominalnie spoczynkowych złączach oraz, zachodzące przy niezbyt wysokich temperaturach, zgrzewanie na zimno, jak również zacieranie zimne i zacieranie gorące typu adhezyjnego. W klasyfikacji B.I. Kosteckiego [16] zdefiniowano odpowiednio szczipanie I i szczipanie II rodzaju. Zapoczątkowanie szczipania następuje na skutek zachwiania równowagi pomiędzy powstawaniem i niszczeniem tzw. struktur wtórnych. Zużywanie w obszarze struktur wtórnych stanowi łagodną formę zużywania, tzw. zużywanie utleniające. Zgodnie z poglądami J. Sadowskiego [17] zachwianie ustalonego procesu zużywania następuje na skutek znacznego wzrostu składowej adhezyjnej w mechanizmie zużywania, będącym wypadkową dwóch składowych: mechanizmu adhezyjnego i mechanizmu utleniającego. Przy zapewnieniu stabilności procesu, łatwej do osiągnięcia w przypadku małych wartości prędkości i przy niewielkich naciskach, intensywność zużywania jest nieznaczna, zachwianie stabilności może prowadzić do znacznego wzrostu zużycia. Wzrost składowej adhezyjnej powodowany jest przekroczeniem wartości krytycznych prędkości i nacisków będących wymuszeniami zewnętrznymi.

Zużywanie zmęczeniowe zachodzi na skutek cyklicznego obciążania warstwy wierzchniej. Obszerna analiza stanu modelowania zużywania w warunkach tarcia suchego i granicznego została przeprowadzona przez W. Zwierzyckiego [18]. Autor przedstawił miary zużycia, scharakteryzował mechanizmy zużywania oraz przedstawił modele obliczeniowe zużycia.

W zależności od stanu naprężeń w styku, jak również warunków, w jakich tarcie się odbywa można rozróżnić różne typy zużywania zmęczeniowego: spalling może wystąpić w suchym lub słabo smarowanym styku przy cyklicznym obciążeniu, pitting występujący w styku smarowanym przy toczeniu lub toczeniu z poślizgiem, zużywanie delaminacyjne występuje przy tarcii ślizgowym i tocznym na sucho lub przy słabym smarowaniu, a także przy zużywaniu udarowym. Intensywność zużywania w wyniku spallingu zależy od nacisków, częstotliwości obciążania styku, kształtu i wymiaru styku, własności mechanicznych materiału, głębokość pęknięcia od powierzchni w przypadku zużycia delaminacyjnego [19] zależy od właściwości materiału i współczynnika tarcia.

Zużywanie ściernie jest najpowszechniejszym mechanizmem zużywania, występującym w obecności cząstek mechanicznych w strefie tarcia, przy czym cząstki te (ziarna ściernie) mogą być luźne lub umocowane. Formą intensywnego zużycia ściernego jest tzw. mikroskrawanie ujawniające się w przypadku występowania w strefie tarcia ziaren twardych. Przy dużych prędkościach względnych ścierniwa i powierzchni roboczych wydzielające się ciepło tarcia powodujące mięknięcie metalu może istotnie zmienić warunki zużywania. Zużycie ściernie poddawane licznym badaniom opisywane jest wieloma modelami empirycznymi [20–22].

Erozja to rodzaj uszkodzania elementów na skutek uderzania cząstek obdarzonych dużą prędkością. W przypadku zużycia erozyjnego związanego z tarcie rozpatruje się erozję spowodowaną przez strumień cząstek stałych. A. Magnee [23] uwzględnił dwie składowe w modelu zużycia przez erozję:  $W_D$  – zużycie przez deformacje,  $W_C$  – zużycie przez ścieranie. Przeprowadzone przez niego badania wykazały ścisły związek pomiędzy udziałem deformacyjnej i ścinającej składowej zużycia, rodzajem materiału a wielkością zużycia. Do rzadziej rozpatrywanych mechanizmów zużywania należy zużycie udarowe. Propozycję techniki modelowania zużywania udarowego przedstawiono między innymi w artykule [24].

Koncepcja podziału zużycia z punktu widzenia sposobu przejawiania się i detekcji została zaproponowana przez M. Szczerka [25].

Inny sposób klasyfikacji zużycia zaproponował L. Sitnik [26] dzieląc zużycie na zużycie chwilowe i skumulowane. Autor proponuje opis skumulowanych ubytków masy w funkcji czasu jako zależność logarytmiczną określa również maksymalną wartość prędkości zużywania i proponuje, aby okres do osiągnięcia tego maksimum uznać za okres docierania. Wyznaczenie współczynników występujących w modelu oraz czasu docierania odbywa się doświadczalnie. Autor prowadził badania dla zużycia kawitacyjnego przy różnych wartościach

intensywności obciążania, wyznaczając dla nich współczynniki. Z jego badań wynika, że zużycie całkowite jest sumą składowych określonych dla poszczególnych wartości obciążenia i że kolejność zmian intensywności obciążenia nie wpływa na końcową wartość zużycia. Umożliwia to prognozowanie wartości zużycia przy zmiennym obciążeniu, jeżeli znane są przebiegi zużycia przy stałych obciążeniach, które można wyodrębnić z obciążenia zmiennego. Niezbędna jest przy tym znajomość kolejności zmian oraz przedziały czasowe trwania danego obciążenia, jak również wartość zużycia granicznego.

Autorzy artykułu [27] wskazali na 182 równania wielu typów zużycia, jednocześnie charakterystyczna jest ich mała przydatność do wykorzystania, szczególnie w przypadku „zautomatyzowanego” projektowania, dla którego niezbędne są precyzyjne opisy zależności w postaci wzorów matematycznych. Wśród przeanalizowanych prac wiele prezentowało rezultaty studiów przeprowadzonych z użyciem mikroskopów i znacznej liczby zróżnicowanych urządzeń analitycznych dostarczających cennych informacji, stanowiących bazę wyników doświadczalnych, która powinna być wykorzystana w działaniach aplikacyjnych.

#### **4. Techniki komputerowe w modelowaniu obiektów tribologicznych**

Zapewnienie poprawy możliwości wykorzystania wyników badań naukowych w zastosowaniach aplikacyjnych, umożliwiających poprawę konkurencyjności gospodarki stanowi istotne wyzwanie w niemal wszystkich dziedzinach wiedzy, ze szczególnym zaadresowaniem do obszarów bezpośrednio związanych z rozwojem techniki. Wykorzystanie do realizacji tego celu technik komputerowych staje się nieodzownym narzędziem już nie tylko przyspieszającym obliczenia, ale również wydobywającym wiedzę z baz dostępnych wyników doświadczalnych.

W ostatnim okresie również w tribologii obserwowany jest wzrost zainteresowania badaczy wykorzystaniem technik informatycznych w badaniach zarówno do sterowania i kontroli przebiegu procesu badawczego jak również analizy wyników.

Metoda symulacji komputerowej prognozowania oporów tarcia została zaprezentowana w artykule [28]. Autorzy zaproponowali model kontaktu pary tarczej polimer–polimer. W procesie modelowania wykorzystano opis topografii powierzchni otrzymany metodą techniki mikroskopii atomowo-siłowej. Przedstawiono porównanie wyników symulacji komputerowej z wynikami badań eksperymentalnych. Autorzy wnioskuje o przydatności metody przy doborze optymalnych ze względu na minimalne straty energetyczne (w fazie rozruchu mikrołożyska ślizgowego) skojarzeń materiałowych czop–panewka.

Inny przykład dotyczy modelowania tarcia suchego [29]. Analizie poddano statystyczne oddziaływania mikronierówności. Opracowany na podstawie rozważań model analityczny tarcia suchego z uwzględnieniem oddziaływań pla-

stycznych określa współczynnik tarcia, uwzględniając charakterystyki własności mechanicznych materiałów, charakterystyki geometrii styku oraz empirycznie wyznaczany parametr  $f$  zależny od względnej wytrzymałości połączeń tarciovych (może być interpretowany jako intensywność oddziaływań adhezyjnych powierzchni współpracujących). Dla opracowanego modelu zbudowano symulator komputerowy umożliwiający uzyskanie charakterystyk współczynnika tarcia dla wybranych skojarzeń materiałowych. Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych wykazują dużą zgodność z wynikami doświadczalnymi badań przeprowadzonych dla skojarzeń ceramika–stal w zakresie przyjętych obciążeń.

Analityczny model, z jego numeryczną reprezentacją, opracowany w celu zbadania niestabilności powodowanej powstawaniem oscylacji w procesach tarcia, został opisany w artykule [30]. Model uwzględnia zarówno dynamikę systemu mechanicznego, jak i silnie nieliniowe właściwości oddziaływań w styku, numeryczna forma modelu pozwala na sprawne przeprowadzanie obliczeń prognozujących skutki tarcia. Badania eksperymentalne dały wyniki dobrze skorelowane z analityczną predykcją niestabilności potwierdzając w ten sposób zasadność modelu.

Metody wykorzystujące techniki komputerowe do prowadzenia obliczeń skutków tarcia z uwzględnieniem zjawisk dynamicznych zostały zaprezentowane między innymi w [31], modelowanie styku oraz zagadnienie prognozowania zużycia z zastosowaniem symulacji komputerowej, przedstawiono w [32]. W pracy [33] autor wykorzystał numeryczno-analityczne modelowanie w badaniach łożyska ślizgowego. Celem badań z wykorzystaniem komputerowej symulacji zaprezentowanych w [34] było opracowanie fizycznego modelu do symulacji przejścia pomiędzy erozją i korozją w warunkach podwyższonej temperatury. W modelu rozważano właściwości cząstek (kształt, rozmiar, gęstość, twardość, zmienność) obiekt (odporność na korozję, twardość, kąt natarcia) i środowisko (skład atmosfery, temperatura). Rezultaty zostały wykorzystane do budowy komputerowego generatora obrazów zerodowanej powierzchni.

Przedstawiona analiza złożoności zagadnień tribologicznych, jak również stanu modelowania oraz możliwości przewidywania skutków tarcia wskazują na potrzebę poszukiwania nowych metod. Wśród badaczy wzrasta zainteresowanie wykorzystaniem metod z udziałem sztucznych sieci neuronowych do modelowania problemów tribologicznych. Szczególnie przydatne w zastosowaniach tribologicznych wydają się: aproksymacja funkcji wielu zmiennych do modelowania procesów oraz metody klasyfikacji w zastosowaniach do konkretnych obiektów (maszyn) [35].

Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do predykcji współczynnika tarcia zaproponowali J. Marshall i R. Dwyer-Joyce [36]. Autorzy w procesie uczenia sieci typu perceptron wielowarstwowy wykorzystali dane literaturowe oraz wyniki badań własnych. Zaprezentowane podejście wskazuje na możliwość poprawienia jakości modeli poprzez wykorzystanie wyników badań uzyskanych przez innych.

A. Jankowska [37] przedstawiła modele neuronowe opracowane dla predykcji siły tarcia oraz drgań tarciovych w układach płynowych. Średnie błędy predykcji uzyskane w badaniach laboratoryjnych wskazują na dobre dopasowanie modeli. Jednak jak sama autorka podkreśla „opracowanie modelu parametrów drgań tarciovych do pracy w rzeczywistym obiekcie musi poprzedzać zgromadzenie pełniejszego materiału pomiarowego”.

Analizy możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych w badaniach tribologicznych dokonali S. Grymek, K. Druet i J.I. Łubiński [38]. Autorzy wskazują na potencjalne możliwości wykorzystania tej techniki w zagadnieniach tribologicznych oraz zainteresowanie środowiska naukowego modelami neuronowymi analizując jednocześnie błędy popełniane przez badaczy, związane głównie ze zbyt małym zbiorem wektorów uczących, wykorzystywanych w procesie uczenia sieci.

Przegląd literatury dotyczący zastosowania sztucznych sieci neuronowych w aplikacjach tribologicznych przeprowadzony przez L. Frangu i M. Ripa [35] dowodzi dużego zainteresowania tą techniką. Autorzy wskazują na prace dotyczące prognostycznych modeli zużycia [38], badania topografii powierzchni po określonym czasie zużycia [40] oszacowania zużycia narzędzia w procesie mikroskrawania [41, 42]. Interesujący test opisany w [43] dotyczy oszacowania zużycia narzędzia. Narzędzie przenoszone jest okresowo ze stanowiska pracy na stanowisko badawcze, gdzie dokonywany jest pomiar siły tnącej, wynik pomiaru stanowi wartość wejściową modelu neuronowego, który szacuje wartość zużycia narzędzia. Na podstawie wyniku oszacowania podejmowana jest decyzja o wymianie narzędzia. Inny przykład dotyczy oceny przydatności oleju stosowanego w połączeniach smarowanych [43]. Model neuronowy na podstawie charakterystyk wybranych właściwości oleju prognozuje moment jego wymiany.

W literaturze przedmiotu prezentowane są przykłady zastosowań sztucznych sieci neuronowych do rozwiązywania problemów klasyfikacyjnych, w zagadnieniach diagnostyki łożysk [44] oraz do klasyfikacji warunków zużycia czy też określania stadium zużycia na podstawie analizy kształtu cząstek zużycia [45].

Jak wskazuje analiza aplikacji sztucznych sieci neuronowych, często używane modele są znacznie lepsze od modeli analitycznych albo też mogą stanowić jedyne możliwe rozwiązanie w przypadkach złożonych zagadnień, dla których rozwiązanie analityczne nie jest możliwe do uzyskania.

## **5. Zagadnienie wykorzystania wyników badań w modelowaniu obiektów tribologicznych**

Prowadzone badania eksperymentalne zwiększają znacznie bazę wyników badań, których efektywne wykorzystanie wymaga zastosowania odpowiednich metod pozwalających na ich przetworzenie umożliwiające uzyskanie wiedzy niezbędnej dla praktycznych aplikacji. Zgromadzone wyniki badań naukowych

stanowią bazę informacji, na podstawie której dąży się do uogólnień w formie modeli matematycznych, opisujących zależności pomiędzy parametrami i warunkami prowadzenia procesu a charakterystykami wyjściowymi.

Wiedza tribologiczna składa się z obszernej bazy wyników badań, zbioru opracowanych modeli tarcia i zużycia oraz heurystyk (zdroworozsądkowych zasad) sformułowanych na podstawie wieloletnich doświadczeń. Analiza systemów zarządzania danymi w obszarze badań tribologicznych wskazuje na istniejące niedostatki w tym zakresie. Dane uzyskiwane w wyniku zaprojektowanych i przeprowadzonych eksperymentów tribologicznych są zazwyczaj gromadzone i wykorzystywane przez zespoły realizujące te badania. Porównywanie wyników uzyskanych przez różnych badaczy przy stosowaniu różnych technik i metod badawczych jest nieuzasadnione merytorycznie. Budowane są bazy danych o specyficznych właściwościach materiałów, czy o specyficznych wielkościach, umożliwiających określenie trwałości węzłów tarcia [46]. Przegląd istniejących rozwiązań w zakresie istniejących tribologicznych banków informacji przedstawiono między innymi w [18]. Pracownicy Federalnego Instytutu Badań Materiałowych w Niemczech opracowali bazę danych zawierającą informacje na temat właściwości tribologicznych ponad 10000 skojarzeń materiałowych [47]. Wyniki zawarte w bazie pochodzą jednak z badań prowadzonych na różnych stanowiskach badawczych. Wieloletnie prace ukierunkowane na opracowanie banku informacji tribologicznych prowadzone są pod kierunkiem S.M. Zacharowa [48]. Celem tych prac jest opracowanie systemu zawierającego dane dotyczące typowych węzłów tarcia, tribologicznych właściwości materiałów, urządzeń i metod badawczych.

Z przeprowadzonej analizy istniejących różnych systemów gromadzenia informacji tribologicznej wynika, że pomimo prowadzonych prac nad uporządkowaniem danych tribologicznych, informacje zawarte w bazach często nie nadają się do zastosowania w metodach obliczeń projektowych, a ich rola ogranicza się np. do dokonania wstępnego doboru materiałów. Praktyczne znaczenie mają tematyczne bazy danych dotyczące konkretnych sytuacji tarciovych, np. Pull-Planner<sup>TM</sup> 2000Software<sup>1</sup> zawierająca informacje dotyczące przeciągania kabli, między innymi współczynniki tarcia dla różnych kombinacji typów kabli i otulin czy baza danych dla projektantów systemów przesyłowych ciepła, zawierająca współczynniki tarcia (prawie 5000 punktów) [48]. Większość tego rodzaju baz danych stanowi komercyjne propozycje zawierające często dodatkowe oprogramowanie wspomagające proces projektowania.

---

<sup>1</sup> Cable Pulling Software for Electrical & Communication.

## 6. Podsumowanie

Jak wynika z przeprowadzonej analizy zagadnień tribologicznych, ze względu na obszar tematyczny obejmujący znaczną różnorodność i zmienność procesów na obecnym etapie rozwoju wiedzy, praktyczne wykorzystanie wyników badań warunkowane jest wykorzystaniem modeli najlepiej opisujących analizowaną sytuację tribologiczną. Oznacza to potrzebę gromadzenia wyników badań w formie umożliwiającej ich sprawne wykorzystanie do opracowania modeli przy zastosowaniu odpowiednio wybranych narzędzi modelowania.

Upowszechnienie i szerokie wykorzystanie wyników badań naukowych z obszaru tribologii jest ograniczone nie tylko ze względu na specyficzne warunki procesów, w których zostały uzyskane, ale również brak odpowiednio zorganizowanych systemów przechowywania danych, które umożliwiłyby dostęp do informacji szerszemu gronu użytkowników oraz wymianę danych w zakresie wspólnych obszarów badawczych. Problem ten wydaje się trudny do rozwiązania nie tylko z powodów organizacyjno-technicznych, ale przede wszystkim ze względów komercyjnych i wzrastającej konkurencyjności. Organizowane są, co prawda, konsorcja dla realizacji wspólnych programów badawczych, ale i w tym wypadku prawa do wykorzystania wyników są ściśle określone podpisanymi porozumieniami. Dane z komercyjnych baz danych mogą stanowić cenne uzupełnienie wyników badań własnych, jednak niezbędne jest w każdym przypadku prowadzenia badań zaprojektowanie i wdrożenie odpowiedniego systemu zarządzania wynikami, tak aby przy jego wykorzystaniu możliwe było również sterowanie prowadzonymi procesami.

Istotne zagadnienie badawcze stanowi opracowanie metodyki projektowania systemu informacyjnego umożliwiającego zarządzanie wynikami prowadzonych badań naukowych oraz danymi pochodzącymi z procesów zrealizowanych na obiektach w warunkach eksploatacyjnych. System taki stanowi bardzo ważny element zapewniający dostarczanie danych niezbędnych do opracowania modeli, wśród których ze względów praktycznych ważne miejsce powinny zajmować modele ukierunkowane na bezpośrednie wykorzystanie w praktyce. W procesie modelowania znaczącą rolę odgrywa zastosowanie symulacyjnych metod badawczych oraz wykorzystanie komputerowych metod obliczeniowych, pozwalające na wnikliwą analizę posiadanych zasobów informacyjnych. Wykorzystanie odpowiednich technik symulacyjnych jest niezwykle istotne również ze względu na możliwość znacznego obniżenia kosztów uzyskaniażądanego rozwiązania, jak i skrócenia czasu związanego z wdrożeniem wyników badań.

Odpowiednio zaprojektowany system zarządzania informacją w procesach badawczych powinien uwzględniać narzędzia wspomagające opracowanie modeli na podstawie danych zgromadzonych w systemie.

*Praca wpłynęła do Redakcji 18.06.2007 r.*

**Bibliografia**

- [1] Leszek W.: Badania empiryczne. Wybrane zagadnienia metodologiczne, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1997.
- [2] Sikora J.: Zasady modelowania przy doświadczalnej identyfikacji obiektów tribologicznych, W: Wybrane problemy tribologii PWN, Warszawa 1990.
- [3] Leszek W., Mazurkiewicz A., Trzos M.: Projektowanie eksperymentalnych systemów badawczych w budowie i eksploatacji maszyn. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1999.
- [4] Meng H.C., Ludema K.C.: Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear* 181–183 (1995), pp. 443–457.
- [5] Rhee S.K.: Wear equation for polymers sliding against metal surfaces. *Wear*, 16 (1970), pp. 431–445.
- [6] Archard J.F.: Contact and rubbing of flat surfaces. *J. Appl. Phys.* 24 (1953) 981–988.
- [7] Hornbogen E.: The role of fracture toughness in the wear of metals. *Wear*, 33 (1975), pp. 251–259.
- [8] Challen J.M., Oxley P.L.B.: An explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models. *Wear*, 53 (1979), pp. 229–243.
- [9] Evans A.G., Marshall D.B., in Rigney D.A. (red): *Fundamentals of Friction and Wear of Materials*. American Society for Metals. Metals Park, OH, 1981, p. 439.
- [10] Quinn T.F.J.: Oxidational wear. *Wear*, 18 (1971), pp. 413–419.
- [11] Meng H.C., Ludema K.C.: Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear* 181–183 (1995), pp. 443–457.
- [12] Andersson S., Soderberg A., Bjorklund S.: Friction models for sliding dry, boundary and mixed lubricated contacts. *Tribology International* 40 (2007) 580–587.
- [13] Leszek W.: Jeszcze raz i nieco inaczej o tribologii. MCNEMT, Radom 1994.
- [14] Rakowski W.A.: Istota procesu kinetycznego tarcia zewnętrznego oraz modelowanie i symulacja cyfrowa. *Zeszyty naukowe AGH Mechanika*, z. 19, Kraków 1989.
- [15] Magnee A.: Generalized law of erosion: application to various alloys and intermetallics. *Wear* 181–183 (1995), pp. 500–510.
- [16] Kosteckij B.I.: Klasyfikacja rodzajów zniszczenia powierzchniowego i ogólne prawo tarcia i zużycia. *Trybologia*, 1983, 5–6, s. 4–7.
- [17] Sadowski J.: Ciepłno-mechaniczne podstawy zużycia utleniającego towarzyszącego tarcia zewnętrznemu metali. WSI, Radom, 1984.
- [18] Zwierzycki W.: Prognozowanie niezawodności zużywających się elementów maszyn. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Instytut Technologii Eksploatacji.
- [19] Suh N.P.: The Delamination Theory of Wear. *Wear*, vol. 25, 1973, s. 111–124.
- [20] Chrushhiov M.M.: Zakonomernosti abrazivnogo iznashivaniya. W: *Iznostojkost'*. Nauka, Moskva 1975, s. 5–28.
- [21] Mutton P.I., Watson J.D.: Some effects of microstructure on the abrasion resistance of metals. *Wear*, vol. 48, 1978, p. 385–389.
- [22] Giltrow J.P.: A relationship between abrasive wear and cohesive energy of materials. *Wear*, vol. 15, 1979.
- [23] Magnee A.: Generalized law of erosion: application to various alloys and intermetallics. *Wear* 181–183 (1995), pp. 500–510.
- [24] Lewis R.: A modelling technique for predicting compound impact wear. *Wear* 262 (2007) 1516–1521.

- [25] Szczerek. M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1997.
- [26] Sitnik L.: Kinetyka Zużycia. Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 1998.
- [27] Meng H.C., Ludema K.C.: Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear* 181–183 (1995), pp. 443–457.
- [28] Kwacz M., Rymuza Z., Kusznierewicz Z.: Prognozowanie oporów tarcia w fazie rozruchu w mikrołożysku ślizgowym polimerowym. *Tribologia* 1/2002 (181), 299–313.
- [29] Jedynak R., Sułek W.: Analiza oddziaływań plastycznych w układzie stal–ceramika. *Tribologia* 4/2001 (178).
- [30] Tworzyło W.W., Hamzeh O.N., Zaton W., Judek T.J.: Friction – induced oscillations of pin – on – disk slider: analytical and experimental studies. *Wear*, vol. 236 1999, pp. 9–23.
- [31] Tworzyło W.W., Backer E.B., Oden J.T.: Numerical modeling of friction-induced vibration and dynamic instabilities. In: R.A. Ibrahim, A. Soom (Eds) *Friction – Induced Vibration, Chatter, Squeal and Chaos*, ASME, New York, vol. 49, 1992, pp. 13–32.
- [32] Trzos M.: Zastosowanie badań symulacyjnych do prognozowania zużycia XXII Jesienna Szkoła Tribologiczna pt. Zużycie Tribologiczne – Teoria, Badania i Problemy Utylitarne Gliwice – Ustroń 1998, s. 297–301.
- [33] Miszczak A.: Rozwiązania numeryczne rozkładów ciśnień dla turbulentnego przepływu ferrosmaru w szczelinie poprzecznego łożyska ślizgowego. *Tribologia* 2/2002, 182, s. 461–474.
- [34] Stack M.M, Song-Roehrle Q., Stott F.H, Wood G.C.: Computer simulation of erosion-corrosion interactions at elevated temperatures *Wear* vol. 181–183, 1995, pp. 516–523.
- [35] Frangu L., Ripa M.: Artificial neural networks applications in Tribology – a survey. NIMIA-SC2001 – 2001 NATO Advanced Study Institute on Neural Networks for Instrumentation, Measurement and Related Applications: Study Cases Crema, Italy, 9–20 October 2001.
- [36] Marshall J., Dwyer-Joyce R.: Neural network prediction tool for kinetic friction <http://www.shef.ac.uk/mecheng/tribology/research/projects/resneurl.html>.
- [37] Jankowska A.: Sztuczne sieci neuronowe jako predykcyjne modele tarcia w układach płynowych. *Tribologia* 3/2003, (189), s. 81–101.
- [38] Grymek S., Druet K., Łubiński J.I.: Perspektywy obliczeń neuronowych w inżynierii łożyskowania. *Tribologia* 1/2002, (181), s. 227–237.
- [39] Gimondo P. et al.: “Neural Networks for Predicting Tribological Experimental Results” in *Proc. World Tribology Congress, Vienna, 2001* (paper on CD).
- [40] Ao Y., Wang Q.J. Chen P.: Simulating the Worn Surface in a Wear Process in *Proc. World Tribology Congress, Vienna, 2001* (paper on CD).
- [41] Tansel I.N. et al.: Tool wear estimation in micro-machining. – Part I tool usage-cutting force relationship, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol. 40, no. 4, pp. 599–608, March 2000.
- [42] Tansel I.N. et al.: Tool wear estimation in micro-machining. – Part II: neural-network-based periodic inspector for non-metals, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol. 40, no. 4, pp. 609–620, March 2000.

- [43] Sinha A.N., Mukherjee P.S., De A.: Assessment of useful life of lubricants using artificial neural network. *Ind. Lubric. And Tribology*, vol. 52, no. 3, pp. 105–109, 2000.
- [44] Vyas N.S., Satishkumar D.: Artificial neural network design for fault identification in a rotor-bearing system. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 36, no. 2, pp. 157–175, 2001.
- [45] N.K. Myshkin et al., “Classification of wear debris using a neural network”, *Wear*, vol. 203–204, pp. 658–662, 1997.
- [46] Rowe W.B., Cheng K., Ives D.: An intelligent design system for recessed hydrostatic journal bearings. *Wear*, vol. 159, 1992, p. 95–105.
- [47] Woydt M., Metel H., Erlebach R., Santner E.: Tribocollect – Tribological database with more than 10 000 data sets. 10th International Colloquium „Tribology – Solving Friction and Wear Problems. Eslingen, 1996, s. 1241–1242.
- [48] Zacharow S.M.: *Komputernaja tribologia*. *Trenie i Iznos*, 1/1993, s. 98–106.
- [49] Ravigurguran T.S., Rabas T.J.: Single-Phase, Turbulent Heat-Transfer Friction\_Factor Data Base Flow Enhanced Tubes. Dostępne (kwiecień 2007) [http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=10197105](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=10197105).

### **Developmental tendencies of modelling the tribological system**

#### **S u m m a r y**

The article presents the issue of tribological models development. Classification of tribological models is presented. Computer systems are significant as supporting instruments for tribological models creation, because of this, the article presents a computer technique for modelling tribological objects. The scale and limitations of the use of results of empirical investigations are analyzed. The need to develop computer systems for acquisition and organization of experimental data is underlined.

*Praca finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego PN „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008.*

