

MIECZYŚLAW KORZYŃSKI*, JAROSŁAW SĘP*

Komputerowe wspomaganie badań tribologicznych

Słowa kluczowe

Tribologia, komputerowe wspomaganie.

Keywords

Tribology, computer aid.

Streszczenie

W pracy przedstawiono zagadnienia komputerowego wspomagania krajowych prac naukowo-badawczych z tribologii. Zwrócono uwagę na pierwsze zastosowania technik numerycznych oraz poddano analizie współczesne zastosowania metod komputerowych. Współcześnie najbardziej aktualne zagadnienia z tego obszaru to: modelowanie i symulacja procesów tribologicznych, projektowanie materiałów na węzły ślizgowe, rozwój metod inżynierii powierzchni, opracowywanie metod prognozowania zużycia węzłów tribologicznych, badanie procesów tarcia płynnego oraz zagadnienia biotribologii. Wyżej wymienionej tematyce w latach 2002–2007 w Polsce poświęconych było ponad 700 prac. W większości przypadków technika komputerowa wykorzystywana była głównie w celu wspomoczenia opracowania wyników realizowanych badań. Dość duży obszar zastosowań techniki komputerowej to sterowanie stanowiskiem badawczym, rejestracja wyników pomiarów i prezentacja wyników badań. Występują również prace ukierunkowane na komputerową symulację zjawisk i procesów tribologicznych. Liczba prac tej grupy wzrasta od roku 2006.

W artykule przedstawiono również przykłady prac ilustrujących możliwości i zastosowania wybranych narzędzi komputerowych. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że w polskiej tribologii w porównaniu z innymi dziedzinami nauk stosowanych, komputerowe wspomaganie prac naukowych nie jest tak znaczne. Pojawiają się jednak symptomy, że w niedalekiej przyszłości sytuacja ulegnie znaczącej poprawie.

* Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel. (17) 8651237, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Organizacji Produkcji, ul. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów.

Zastosowania technik numerycznych w badaniach tribologicznych w Polsce notuje się już pod koniec lat 60. Tak np. pierwsze obliczenia numeryczne pełnego równania Reynoldsa dla laminarnego przepływu izotermicznego w poprzecznym łożysku ślizgowym o skończonej długości wykonał J. Burcan w 1971 roku [5]. Ten sam autor w 1973 r. [3] wykonywał obliczenia numeryczne łożyska z panewką hiperboloidalną, a w 1975 r. podał rozwiązanie dla filmu nieizotermicznego [4]. Wśród innych prac z tego okresu można wymienić problem elastohydrodynamicznego smarowania, który numerycznie rozwiązywał już w 1972 r. H. Krzemiński-Freda [19] i zagadnienie płaskiego przepływu oleju w poprzecznym łożysku ślizgowym [57] analizowane przez K. Wierzcholskiego w 1974 r.

Rozkład ciśnienia i nośność hydrodynamiczną w perycykloidalnym łożysku ślizgowym wyznaczał numerycznie J. M. Stasiak w roku 1975 [43], a problem niestacjonarnego elastohydrodynamicznego smarowania w polu magnetycznym w kontakcie dwóch walców rozwiązali S. Pytko i K. Wierzcholski [29]. Natomiast pełne rozwiązanie równania Reynoldsa dla pseudoplastycznego modelu potęgowego Reinara-Rivlina, stosując numeryczną technikę obliczeń uzyskał w r. 1978 K. Wierzcholski [53, 58].

Rozwiązanie numeryczne problemu hydrodynamicznego smarowania przy skawitowanym filmie olejowym, modyfikując i udoskonalając klasyczne równanie Reynoldsa, przedstawił J. Kiciński w 1985 roku [18].

W tamtych latach były to prace prekursorskie, gdyż technika obliczeń numerycznych nie była tak rozwinięta i tak łatwa w stosowaniu jak współcześnie.

Obecnie tribologia, jedna z najstarszych nauk technicznych, przeżywa okres intensywnego rozwoju, m.in. za sprawą olbrzymiego postępu technik komputerowych, który w ostatnich latach nadał nowy wymiar pracom z dziedziny tarcia, smarowania i zużycia. Kronikę i obraz zmian zachodzących w tribologii polskiej (uznawanej za niepozostającą w tyle za światową) stanowią materiały kolejnych szkół tribologicznych oraz takich czasopism jak Tribologia oraz (w mniejszym stopniu) Zagadnienia Eksploatacji Maszyn (ZEM). Śledząc ich tematykę w kolejnych latach, można stwierdzić, że najbardziej aktualne zagadnienia to:

- Modelowanie i symulacja procesów tribologicznych z wykorzystaniem techniki komputerowej [1–2, 9, 11–12, 14–17, 20, 23, 25, 32, 34, 36–39, 42, 45, 47, 50, 54, 56, 59, 61–64].
- Projektowanie materiałów o konkretnych właściwościach użytkowych, w tym tribologicznych, np. o małym współczynniku tarcia, przeznaczonych do konkretnych warunków pracy [7–8, 10–11, 13–14, 49].
- Rozwój metod inżynierii powierzchni, za pomocą których nadaje się powierzchniom elementów współpracujących w warunkach tarcia cechy najbardziej pożądane w danych warunkach pracy oraz badania nowych rozwiązań konstrukcyjnych i projektowanie nowych typów łożysk [16, 20–21, 24, 27–28, 48, 51, 60].

- Badania i opracowanie metod prognozowania zużycia wężła tribologicznego [6, 8, 14, 22–23, 26, 31, 49–50, 62–63].
- Badania procesów zachodzących podczas współpracy elementów rozdzielonych warstwą środka smarującego i wytwarzanie coraz lepszych środków smarowniczych [6–7, 10, 13–14, 26, 30–31, 41, 44, 49, 52].
- Zagadnienia biotribologii [36–38, 55].

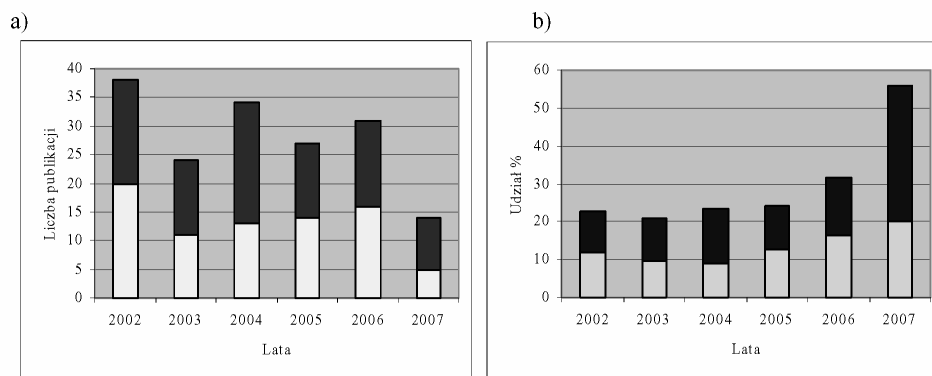
Wyżej wymienionej tematyce poświęconych było ponad 700 prac opublikowanych w czasopismach Tribologia i ZEM w latach 2002–2007. Wśród tych prac trudno jest znaleźć takie, w których nie wykorzystywano techniki komputerowej. Statystyki wykazują, że w ostatnich latach publikowanych jest rocznie po kilkadziesiąt pozycji tematycznych (rys. 1a), w których wykorzystywano technikę komputerową, przy czym ich udział procentowy w ogólnej liczbie publikacji wykazuje (od roku 2002) tendencję wzrostową (rys. 1b), bardzo wyraźną w roku 2007.

Jednakże w większości przypadków technika komputerowa jest wykorzystywana głównie w celu wspomżenia opracowania wyników realizowanych badań – wykonywania obszernych, skomplikowanych obliczeń. Do tych celów, a także dla odpowiedniej prezentacji wyników badań wykorzystywane są przede wszystkim standardowe programy obliczeniowe (najczęściej arkusze kalkulacyjne) i programy graficzne ogólnego zastosowania. Również wykorzystywane są własne, pisane doraźnie przez autorów prac, programy obliczeniowe, umożliwiające obróbkę danych doświadczalnych. Takie (pomocnicze) zastosowanie techniki komputerowej jest już czymś powszechnym (rzec by można trywialnym) w pracach naukowych z dziedziny tribologii i dlatego prac tej grupy nie uwzględniono w statystykach prezentowanych na rys. 1.

Natomiast dość duży obszar zastosowań techniki komputerowej to: komputerowe (mikroprocesorowe) sterowanie stanowiskiem badawczym, rejestracja wyników pomiarów, opracowanie i prezentacja wyników badań za pomocą bardziej wyspecjalizowanych narzędzi (Statistica, MathCad itp.) bądź autorskie, specjalistyczne oprogramowanie. W ostatnich latach udział tak wspomaganych komputerowo badań w ogólnej liczbie prac z dziedziny tribologii wykazuje wyraźny wzrost (rys. 1b). Można powiedzieć, że w niedługim czasie stanie się standardem. Wydaje się, że bez zastosowania techniki komputerowej realizacja prac grupy drugiej byłaby bardzo utrudniona, a ich efektywność znacznie mniejsza.

Technika komputerowa to także potężne narzędzie wspomagające, a w wielu przypadkach wręcz umożliwiające modelowanie i przeprowadzanie symulacji zjawisk i procesów tribologicznych zachodzących w różnych węzłach tribologicznych i różnych warunkach pracy (tarcia). Trudne i skomplikowane zagadnienia modelowania i symulacji zarówno rzeczywistych, jak i hipotetycznych procesów, warunków i węzłów tarcia to zagadnienia poruszane m.in. w pracach [12–13, 17, 20–21, 27–28, 33, 36–39, 50, 60, 63]. W tej grupie prac, w ubiegłych latach nie obserwowano wyraźnej tendencji wzrostowej, dopiero

od roku 2006 sytuacja ta zmienia się na lepsze (rys. 1). Może to wynikać ze stanu wiedzy nt. modelowania procesów tribologicznych, np. brak jest jak dotychczas nawet jednolitej teorii tarcia. Znane są natomiast modele tarcia płynnego. Realizacja komputerowych symulacji w tym obszarze tribologii jest tutaj łatwiejsza niż w przypadku tarcia granicznego i mieszanego. Ukierunkowana jest ona głównie na wyznaczanie statycznych i dynamicznych charakterystyk łożysk, a także określanie obszarów ich stabilnej pracy. Jednak, ze względu na stosunkowo małe zużycie w tych warunkach tarcia, zagadnienia te nie są zbyt istotne dla praktyki badawczej.



Rys. 1. Liczba (a) oraz procentowy udział (b) artykułów o tematyce tribologicznej opublikowanych w Tribologii i ZEM w latach 2002–2007, których autorzy wykorzystywali technikę komputerową do sterowania stanowiskiem bądź analizy wyników (kolor jasny) albo do badań modelowych, symulacji i analizy za pomocą dużych systemów obliczeniowych (kolor ciemny)

Fig. 1. The number (a) and percentage participation (b) of articles on the subject of tribology published in Tribology and ZEM; light color – authors used computer technique to test stand control or results analysis; dark color – authors used computer technique (great computational systems) to model research, simulation and analysis

Natomiast dla tarcia granicznego i mieszanego, bardziej interesujących ze względu na większe zużycie, chociaż odnotowuje się znaczną liczbę (najczęściej eksperymentalnych) prac naukowych i istnieje szereg rozwiązań szczegółowych wielu problemów, to jednak nadal brak jest bardziej uogólnionego modelu o szerszym zakresie zastosowania. Takie zagadnienia jak: modelowanie i symulacja zachowań systemów tribologicznych w strefach współpracujących powierzchni, modelowanie uszkodzeń i zużycia, dynamika przepływów płynów smarowych, zachowanie się nienewtonowskich cieczy smarujących itp. stwarzają poważne trudności metodologiczne, wynikające chociażby z bardzo dużej liczby czynników wpływających na warunki i przebieg procesu smarowania i zużycia. Tym niemniej odnotowuje się już prace badawcze z tego zakresu, są one prowadzone ze wsparciem i z wykorzystaniem „mocnej” techniki komputerowej. W charakterze narzędzi wspomagających wykorzystywane są tutaj metoda elementów skończonych, sztuczne sieci neuronowe oraz duże systemy obli-

zeniowe typu ADINA, ANSYS, ABAQUS, FLUENT itp. Poniżej przytaczamy wybrane przykłady prac, w których wykorzystano i zilustrowano możliwości wspomnianych narzędzi komputerowych.

Przykład 1 – Kompleksowa komputeryzacja stanowiska i wykorzystanie pakietu ADINA 8.1 do modelowania przepływów w szczelinie smarowej [40].

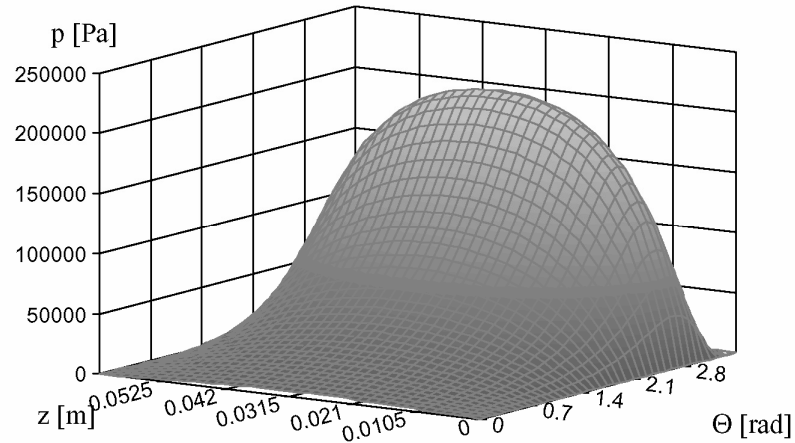
Wspomaganie komputerowe wykorzystano do modelowania trójwymiarowego adiabaticznego przepływu oleju w poprzecznym hydrodynamicznym łożysku ślizgowym. Do tworzenia geometrii i obliczeń wykorzystano pakiety oprogramowania ADINA 8.1, umożliwiające między innymi symulowanie przepływów trójwymiarowych. Symulacja realizowana jest w oparciu o metodę elementów skończonych, a oprogramowanie daje również możliwość graficznego przedstawienia i analizy wyników.

Geometrię szczeliny smarowej zbudowano stosując modelowanie bryłowe. Model oparto na 10 bryłach (utworzonych z 45 powierzchni i 68 linii). Szczelina została odwzorowana w skali 1:1. Modelowanie takie wiernie oddaje geometrię, ale jest kłopotliwe, gdyż wysokość szczeliny smarowej (wzdłuż osi y) jest o dwa rzędy mniejsza od jej długości i szerokości.

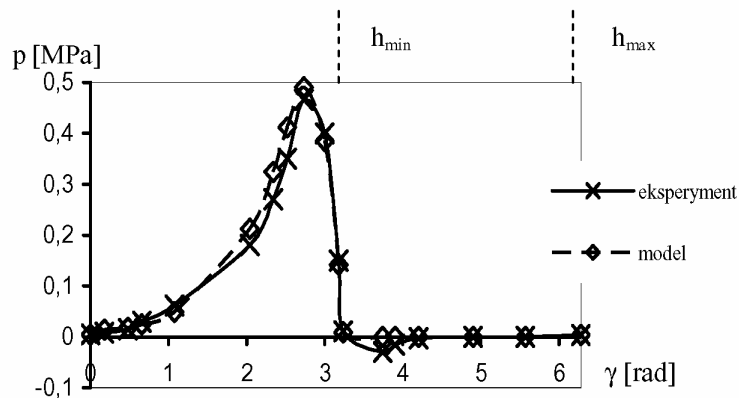
Model szczeliny smarowej został poddany dyskretyzacji na elementy skończone. W objętości szczeliny smarowej wygenerowano 82080 przestrzennych elementów skończonych. Założono, że w łożysku występuje tarcie płynne i olej całkowicie rozdziela współpracujące elementy.

Przepływ opisano układem równań Naviera-Stokesa wraz z równaniem energii. Po wprowadzeniu uprzednio wyznaczonej charakterystyki oleju oraz warunków brzegowych układ równań przepływowych rozwiązano metodą elementów skończonych wykorzystując pakiety oprogramowania ADINA 8.1. Uzyskane wyniki symulacji komputerowej umożliwiają wyznaczenie rozkładu ciśnienia hydrodynamicznego, temperatury oraz prędkości przepływu w filmie olejowym. Bezpośrednio w programie istnieje również możliwość obliczenia wielkości charakteryzujących łożysko (np. nośność, wydatek oleju). Na rys. 2 przedstawiono przykładowy rozkład ciśnienia hydrodynamicznego w części roboczej filmu olejowego.

Wyniki symulacji komputerowych były weryfikowane doświadczalnie. Zestawiono w tym celu stanowisko badawcze, umożliwiające pomiar względnego przemieszczenia czopa i panewki oraz ciśnienia i temperatury w filmie olejowym. Do rejestracji sygnałów (16 parametrów) wykorzystano laboratoryjny komputerowy system pomiarowy DaqLab/2000 (R) współpracujący z czujnikami ciśnienia, temperatury i przemieszczenia. Umożliwia on zarejestrowanie do 20000 wartości każdej mierzonej wielkości w ciągu sekundy. Pełny opis stanowiska zawarto w [34]. Na rys. 3 przedstawiono porównanie eksperymentalnego i uzyskanego w drodze symulacji komputerowych rozkładu ciśnienia.



Rys. 2. Rozkład ciśnienia hydrodynamicznego w części roboczej filmu olejowego
Fig. 2. Hydrodynamic pressure distribution in working part of oil film



Rys. 3. Porównanie eksperymentalnego i obliczonego rozkładu ciśnienia po obwodzie łożyska
Fig. 3. Comparison between experimental and calculated circumferential pressure distribution

Porównanie wyników obliczeń oraz eksperymentów wykazało ich dobrą zgodność, ale otrzymane wyniki nie są identyczne. Rozbieżności wynikają zarówno z niedoskonałości modelowania komputerowego (przybliżenia w matematycznym opisie zjawisk, błędy metody obliczeniowej), jak również niedoskonałości metody pomiarowej.

Symulacje komputerowe mogą być zatem bardzo użytecznym narzędziem rozpoznawania i analizy zjawisk, powinny one jednak być uzupełniane badaniami eksperymentalnymi.

Przykład 2 – wykorzystanie pakietu FEMAP i programu NE/Nastran 8.3 do wizualizacji i analizy wyników badań z wykorzystaniem metody elementów skończonych [36–38].

W alloplastyce stawu biodrowego problem może stwarzać m.in. adaptacja endoprotezy w osłabionych zabiegiem strukturach kostnych. O niepowodzeniu leczenia mogą zdecydować naciski kontaktowe między wszczepem a tkanką kostną, które w strukturach kostnych mogą spowodować przekroczenie progu fizjologicznej wydolności tkanek. Występowanie i rozkład mikroprzemieszczeń oraz sposób przenoszenia naprężeń w obszarach bezpośredniego kontaktu endoprotezy i tkanki mogą mieć zasadniczy wpływ na rokowania odległe implantowanych endoprotez.

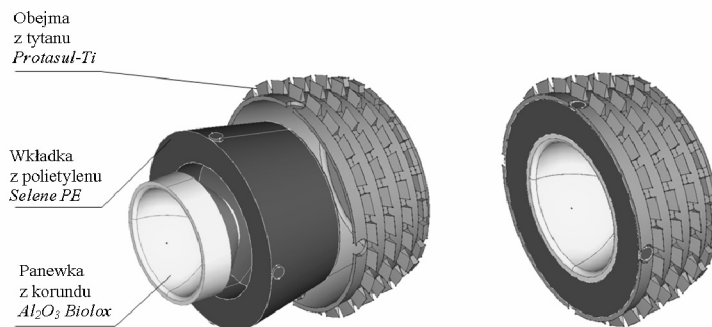
W związku z powyższym podjęto próbę dokonania analizy rozkładu naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera-Missesa-Henck'y (HMH) oraz przemieszczeń wypadkowych w endoprotezie stawu biodrowego. Analizie poddano seryjnie produkowane endoprotezy: cementową typu Weber oraz bezcementową typu Alloclasic SL Zweymüller. Endoprotezy osadzano wirtualnie w strukturach kostnych kości miednicznej i udowej oraz poddawano wymuszeniom wynikającym z warunków lokomocji.

W ramach pracy kolejno wykonano:

- modelowanie geometrii panewki, trzpienia i głowy endoprotezy oraz struktur kostnych kości miednicznej i udowej,
- wirtualne osadzenie endoprotezy w strukturach kostnych,
- import zamodelowanych geometrii do programów liczących metodą elementów skończonych,
- narzucenie parametrów materiałowych i tkankowych,
- zadanie obciążeń i/lub przemieszczeń oraz utwierdzeń całego układu,
- wyznaczenie rozkładu naprężeń zredukowanych (HMH) oraz przemieszczeń wypadkowych.

Do tworzenia geometrii, wykonania analiz i ich wizualizacji wykorzystano pakiet Femap i licencjonowany program NE/Nastran 8.3 [36], dający możliwości modelowania bryłowego, wykonania analiz i oceny wyników analiz w oparciu o MES.

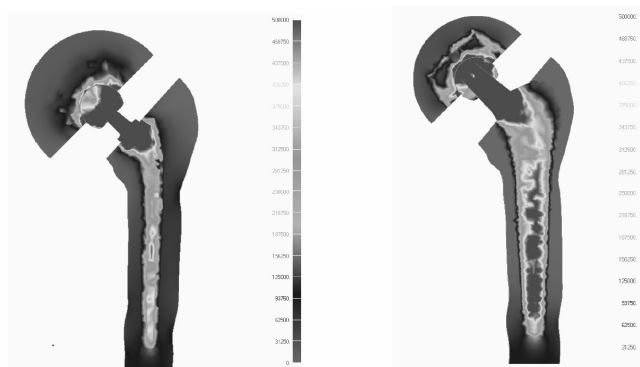
Do tworzenia geometrii panewek warstwowych, głów i trzpieni endoprotez (cementowych i bezcementowych) zastosowano modelowanie bryłowe oparte na algebrze Boola. Wykorzystując odpowiednie funkcje programu (obróć figur płaskich, dodawanie bryłowe, modelowanie i skalowanie różnych struktur) otrzymano geometrię panewek, głów i trzpieni endoprotez (geometria może być tworzona na podstawie pomiarów współrzędnych punktów importowanych jako pliki tekstowe, aplikowana z badań obrazowych spiralną tomografią komputerową lub rezonansem magnetycznym). Przykładowy wynik modelowania przedstawia rys. 4. Otrzymane w ten sposób struktury złożono w wirtualne modele endoprotez.



Rys. 4. Model trójwarstwowej panewki korundowo-polietylenowej z obejmą z tytanu
 Fig. 4. Model of three-layer corundum-polyethylene bush with titanium clamping ring

Do dalszej analizy przyjęto odpowiednie warunki brzegowe i parametry wytrzymałościowe analizowanych struktur (materiałów konstrukcyjnych). Po dokonaniu dyskretyzacji obiektów, narzuceniu warunków brzegowych, zadano zmieniające się statycznie, w kolejnych krokach, obciążenia jednostkowe do wartości maksymalnej 10 MPa i wyznaczono rozkłady naprężeń i przemieszczeń dla rozpatrywanych struktur.

Na rysunku 5 zamieszczono mapy rozkładów naprężeń zredukowanych wg hipotezy HMM odpowiednio w endoprotezie cementowej osadzonej wirtualnie na cemencie w strukturach kostnych kości miednicznej i kości udowej (rys. 5a) oraz bezcementowej zamocowanej na zasadzie osteointegracji w strukturach kostnych kości miednicznej i kości udowej (rys. 5b).



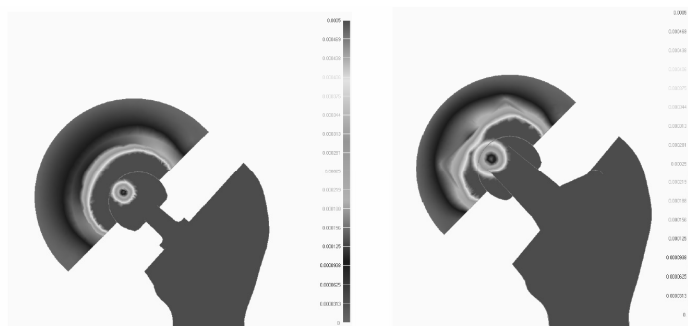
Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy HMM: a) endoproteza cementowa,
 b) endoproteza bezcementowa

Fig. 5. Distribution of reduced stresses according to HMM hypothesis: a) cement endoprosthesis,
 b) non-cement

Analizując obciążone panewki o budowie warstwowej (rys. 5), uzyskano lokalizację naprężeń maksymalnych w strefie głowy i trzpienia endoprotezy

z nieznacznym przechodzeniem naprężeń maksymalnych do pierwszej warstwy panewki – jest to układ sprzyjający współpracy tribologicznej głowy i panewki, który nie będzie powodował przyspieszonego zużycia.

Na rys. 6 przedstawiono mapy obrazujące rozkłady przemieszczeń wypadkowych odpowiednio w endoprotezie cementowej i bezcementowej.



Rys. 6. Rozkład przemieszczeń wypadkowych w endoprotezie: a) cementowej, b) bezcementowej
Fig. 6. Distribution of displacements: a) cement endoprosthesis, b) non-cement

Otrzymane wyniki umożliwiły sformułowanie wielu istotnych wniosków, m.in. dotyczących zagadnień tarcia i zużycia, rozkładu naprężeń i przemieszczeń, charakteru oddziaływania elementów endoprotezy na struktury kostne. Wyniki badań mogą pomóc w określeniu warunków optymalizacji strefy tribologicznej współpracy endoprotezy stawu biodrowego człowieka.

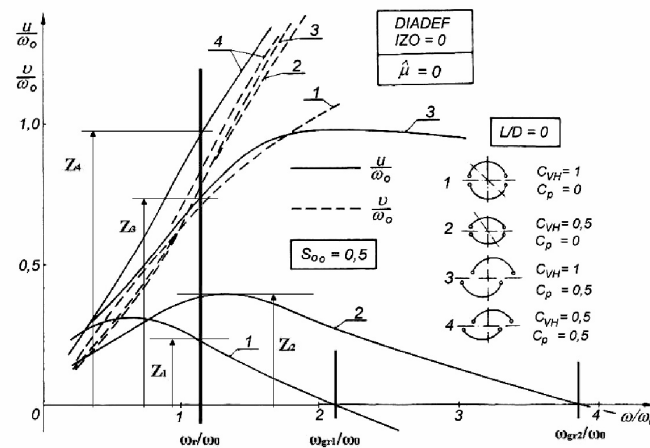
Szczegółowych wyników omawianej pracy tutaj nie przytaczamy, gdyż chodziło nam o przykład zastosowania techniki komputerowej. A przedstawiona technika wirtualizacji stawu biodrowego umożliwi modelowanie i wizualizację obciążenia sztucznego stawu i przyległych tkanek kostnych, pozwala ocenić rozkłady naprężeń i przemieszczeń w warunkach statycznego obciążania kończyny z zaimplantowaną endoprotezą stawu biodrowego w postawie wyprostnej i zgiętej o zadany kąt. Znając te wielkości, w przypadku indywidualnym każdego pacjenta, można dobrać rozwiązanie konstrukcyjne (odpowiednie ukształtowanie geometryczne, odpowiednie warstwy struktur i skojarzenia par tribologicznych) oraz parametry wytrzymałościowe materiałów pozwalające na użycie endoprotezy bardzo wiernie replikującej system stawu naturalnego.

Przykład 3 – wykorzystanie autorskiego pakietu oprogramowania do badań modelowych węzłów tribologicznych dużych maszyn wirnikowych [16–17].

Do badań i analiz łożysk ślizgowych oraz układów wirnik–łożysko z zastosowaniem MES opracowany został w IMP PAN w Gdańsku pakiet oprogramowania (MESWIR) [16], stanowiący narzędzie diagnostyczno-badawcze, umożli-

liwiający modelowanie i analizę dużych maszyn wirnikowych za pomocą widm drgań, a w efekcie „uczenie” i projektowanie różnych wariantów rozwiązań układów adaptacyjnych sterowania i kontroli maszyn wirnikowych.

Oprogramowanie umożliwia modelowanie szczelin smarnych o różnych kształtach a przez to analizę pracy różnego rodzaju łożysk, m.in. z luzem kołowo-cylindrycznym i antywibracyjnych, z nierównoległą osią czopa względem panwi i in. Można określać wartości podstawowych parametrów statycznych łożysk, takich jak: położenie środka czopa w płaszczyźnie luzów, nośność hydrodynamiczną, moc tarcia, grubość filmu olejowego, zużycie oleju itp., a także badać zachowanie się i sporządzać charakterystyki dynamiczne w postaci drgań wymuszonych, tłumienia i częstości drgań własnych badanych układów. Omawiany pakiet programów posiada wiele innych możliwości modelowania i diagnozowania kinostatystyki i dynamiki układów łożysko-wirnik-fundament maszyn wirnikowych, a także możliwości współpracy z innymi specjalistycznymi i komercyjnymi programami. Możliwe jest badanie wielu różnorodnych skojarzeń poszczególnych zespołów i elementów maszyn wirnikowych, a przez to dobór optymalnych rozwiązań badanych obiektów.

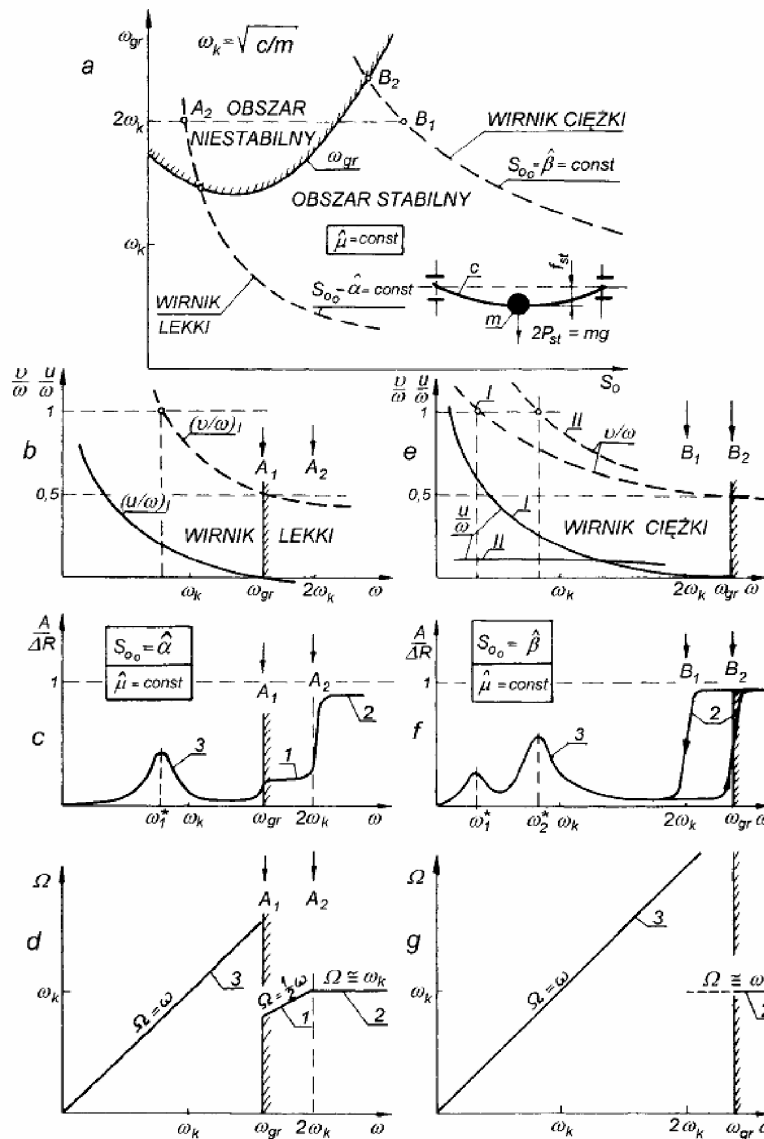


Rys. 7. Przebieg krzywych tłumienia i częstości drgań własnych układu dla łożysk z różną geometrią szczeliny smarnej: 1 – łożysko cylindryczne, 2 – soczewkowe, 3 – offsetowe, 4 – soczewkowo-offsetowe

Fig. 7. Damping curves and free vibrations frequency of bearing system with different bearing interspace geometry: 1 – cylindrical bearing, 2 – lemon bearing, 3 – offset bearing, 4 – lemon-offset bearing

Przykładem zastosowania zaawansowanej techniki komputerowej do rozwiązywania zagadnień tribologicznych są badania modelowe niestabilności hydrodynamicznej układów wirnik-łożysko opisane (m.in.) w pracy [16]. Modelując zachowanie się układu w różnych warunkach, sporządzono w niej podstawowe charakterystyki dynamiczne badanego układu dla łożysk z różną geometrią szczeliny smarnej (rys. 7).

Modelując mechanizm utraty stabilności różnych układów wirnik-łożysko i analizując zagadnienia przepływu w szczelinie smarowej, efekty drgań półwzkowych i rezonansowych oraz mechanizm wzbudzenia i tłumienia dużych oscylacji czopa łożyskowego uzyskano obrazy przebiegu poszczególnych charakterystyk (rys. 8).



Rys. 15. Drgania układu wirnik-łożyska: 1 – drgania półwzkowe, 2 – drgania rezonansowe (wir rezonansowy, bicie olejowe, precesja asynchroniczna), 3 – drgania wymuszone synchroniczne spowodowane niewyważeniem wirującej masy

Fig. 15. Rotor-bearing system vibrations; 1 – half vibrations, 2 – resonant vibrations (resonant whirl, oil whip, asynchronous precession), synchronous forced vibrations caused by unbalanced rotating mass

Symulacja komputerowa różnych układów konstrukcyjnych wirnik–łożysko w warunkach przejścia do drgań o strukturze wirowej, analiza widmowa drgań po przekroczeniu granicy stabilności układu, analiza trajektorii drgań wybranych punktów, symulacja zmian rozkładu ciśnienia hydrodynamicznego w czasie w obszarze bicia olejowego w różnych układach kieszeni lewarowych pozwoliły na określenie charakterystycznych wyróżników diagnostycznych i lepsze poznanie mechanizmu badanych zjawisk przy kosztach znacznie mniejszych niż koszty badań eksperymentalnych.

Podsumowanie

Zjawiska tribologiczne są tak złożone, że bez pomocy techniki komputerowej, w zasadzie już nie można się obyć, chcąc cokolwiek w tej dziedzinie badać. Przedstawiono tutaj jedynie wybrane przykłady, które nie w pełni obrazują możliwości komputerowego wspomagania prac naukowo-badawczych z zakresu tribologii.

Oceniając stan komputeryzacji w polskiej tribologii należy stwierdzić, że w porównaniu z innymi dziedzinami nauk stosowanych (mechanika, konstrukcja maszyn, chemia i fizyka doświadczalna itp.), komputerowe wspomaganie prac naukowych nie jest tak znaczne. Najszersze zastosowanie znajdują tutaj programy ogólnego zastosowania, takie jak: Matlab, MathCad, Statistica oraz inne oprogramowanie komercyjne i firmowe. Wykorzystuje się je głównie do: obliczeń numerycznych, opracowania wyników badań, projektowania węzłów tarcia, analizy i obrazowania topografii powierzchni współpracujących tarciowo, w stanowiskach do badań tarcia i zużycia wspomaganym komputerowo.

Nieco rzadziej wykorzystywane są duże systemy komputerowe, przeważnie do modelowania i symulacji przebiegu procesów tribologicznych. Do nich należy zaliczyć autorskie i komercyjne, duże pakiety programowe [16, 65, i in.], umożliwiające m.in. symulowanie zachowania różnych typów łożysk, wyznaczanie ich pełnych charakterystyk statycznych i dynamicznych, modelowanie łożysk o różnej szerokości klinów smarowych i różnych kształtach kieszeni olejowych, symulowanie przekoszenia czopa w dowolnej płaszczyźnie, zużycia panwi, błędów kształtu panwi, miejscowych ubytków, zachowania łożysk hybrydowych itp. Wspomaganie badań tribologicznych przez takie specjalistyczne, duże, kontrolno-sterująco-analizujące pakiety oprogramowania umożliwia prowadzenie badań przy zastosowaniu metody sieci neuronowych, metody elementów skończonych i podobnych metod badawczo-analitycznych umożliwiając realizację prac o dużej wadze. Takie prace spotyka się coraz częściej, co budzi nadzieje na poprawę sytuacji w przyszłości.

Autorzy dziękują prof. dr hab. inż. Annie Ryniewicz oraz prof. dr hab. inż. Janowi Kicińskiemu za wyrażenie zgody na wykorzystanie wyników ich badań.

Praca wpłynęła do Redakcji 15.06.2007 r.

Literatura

- [1] Banaszek S.: Drgania węzłów łożyskowych dużej maszyny wirnikowej z pękniętym wirnikiem. *Tribologia*, 4, 2004.
- [2] Buchalski K.: Fizyczne własności quasi-dynamicznego elastohydrodynamicznego (EHD) filmu olejowego. *Tribologia*, 4, 2004.
- [3] Burcan J.: Łożysko z panewką hiperboloidalną. *ZEM* nr 3–4(15–16), 1973.
- [4] Burcan J., Stasiak K.: Zagadnienie numerycznego rozwiązywania równań opisujących przepływ czynnika w łożysku ślizgowym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej*, nr 240, zeszyt specjalny nr 10, 1975.
- [5] Burcan J.: Teoria i badania poprzecznego łożyska ślizgowego z hiperpoidalną powierzchnią roboczą. *Rozprawa doktorska*, Politechnika Łódzka, 1971.
- [6] Ciecieląg J., Sadowski J.: Badanie wpływu produktów zużycia na tarcie i zużywanie stali. *ZEM* nr 3(127), 2001.
- [7] Czarnecki A.: Analiza teoretyczna wpływu stereometrii powierzchni na działanie pary tribologicznej. *Tribologia*, 4, 2005.
- [8] Dąbrowski L., Pajęczkowski P., Rotta G., Schubert A., Wasilczuk H.: Klocki samopoziomujące w łożyskach hydrodynamicznych. *Tribologia*, 1, 2007.
- [9] Dymarski Cz.: Analiza możliwości wpływania na pracę promieniowego uszczelnienia ślizgowego poprzez deformowanie jego panwi. *Tribologia*, 1, 2007.
- [10] Flaszyński P., Litwin W.: Numeryczna analiza trójwymiarowego przepływu w poli-merowym łożysku smarowanym wodą. *Tribologia*, 1, 2007.
- [11] Gardyński L., Wroński A.: Analiza czynników technicznych wpływających na zużywanie tłoków silników spalinowych w wyniku zmęczenia cieplnego. *ZEM* nr 3(127), 2001.
- [12] Gawroński Z., Kruszyński B., Kula P., Sawicki J., Zagórniak P.: Synergizm obróbki cieplno-chemicznej i ubytkowej w kształtowaniu trwałości kół zębatach. *ZEM* nr 1(129) 2002.
- [13] Gawroński Z., Kula P., Pietrasik R., Sawicki J.: Nowe technologie utwardzania powierzchniowego ograniczające zmęczenie stykowe części maszyn. *ZEM* nr 2(126), 2001.
- [14] Horoszczyk E., Iglantowicz T., Szydłowski W.: Method of assessment of the abrasive wear resistance of high performance concrete exposed to erosion. *Tribologia*, 5, 2005.
- [15] Janecki J., Piekoszewski W., Wojtas A.: Sposób wykrycia przedawaryjnego wytężenia warstwy wierzchniej elementów tocznych metodą Berkhausena. *Tribologia*, 3, 2005.
- [16] Kiciński J.: *Dynamika wirników i łożysk ślizgowych*. Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk 2005. Modelowanie w budowie i eksploatacji maszyn – tendencje rozwojowe. *Problemy Eksploatacji* nr 3, 2005.
- [17] Kiciński J.: Studium propagacji wirów i bicia olejowego w łożyskach ślizgowych. *ZEM* nr 3(139), 2004.
- [18] Kiciński J.: *Wpływ prehistorii przepływów w ciągłym i skawitowanym filmie*. Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk 1985.
- [19] Krzemiński-Freda H.: Elastohydrodynamiczny film olejowy w warunkach przejściowych. *Zagadnienia Tarcia Zużycia i Smarowania*, z. 11, 1972.
- [20] Krzemiński K.: Zjawiska cieplne w łożyskach porowatych. *Tribologia*, 3, 2005.

- [21] Lacki: Theoretical and experimental analysis of the heat exchange in the T-05 machine of ring-block type. *Tribologia*, 3, 2006.
- [22] Łuczak M.: Wpływ defektu w postaci zukosowania panwi na własności dynamiczne turbozespołu 200 MW. *Tribologia*, 4, 2004.
- [23] Maciąg A.: Wpływ polaryzacji strefy tarcia prądem stałym na opory tarcia granicznego. *Tribologia*, 4, 2005.
- [24] Maciejczyk A., Buchalski K.: Obliczanie współczynnika trwałości łożysk w oparciu o hipotezę nieograniczonej trwałości. *Tribologia*, 2, 2006.
- [25] Miszczak A.: Parametry eksploatacyjne poprzecznych łożysk ślizgowych smarowanych ferrosmarami. *ZEM* nr 2(138), 2004.
- [26] Oleksiak Z., Rudnicki Z.: Komputerowa analiza obrazów zużytych powierzchni. *ZEM* nr 3(131), 2002.
- [27] Olszewski A., Grzymek S., Rotta G., Siwek B.: Metodyka projektowania łożysk ślizgowych z tarczą hydrodynamiczną. *Tribologia*, 3, 2004.
- [28] Olszewski A., Wodtke M., Hryniewicz P.: Ekologiczne łożysko foliowe smarowane wodą – budowa i analiza wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na sztywność podparcia łożyska. *Tribologia*, 1, 2007.
- [29] Pytko S., Wierzcholski K.: *Ferrohydrodynamic Contact between two elastic Cylinders*. International Congress Tech. Acad. of Esslingen, 1980.
- [30] Rakowski W. A., Rabiasz S., Małyjurek P.: Badania łożysk miniaturowych z warstwą sensorową. *Tribologia*, 5, 2005.
- [31] Rochatka T., Stachowiak A., Zwierzycki W.: Analityczno-doświadczalna metoda wyznaczania charakterystyki $In = f(p)$ w układzie 3 wałeczki–stożek. *Tribologia*, 4, 2004.
- [32] Rotta G.: Analiza przepływu oleju przez rowek smarowy wzdłużnego łożyska ślizgowego z wykorzystaniem komputerowej dynamiki płynów (cdf). *Tribologia*, 1, 2007.
- [33] Rotta G.: Modelowanie przepływu oleju w przestrzeni międzysegmentowej łożyska wzdłużnego. *Tribologia*, 4, 2004.
- [34] Rudnicki Z., Figiel W.: Neural nets applications in tribology research. *ZEM* nr 3(131), 2002.
- [35] Rybczyński J.: Wpływ rozosiowania łożysk na trajektorię czopów turbozespołu 13K215. *Tribologia*, 1, 2007.
- [36] Ryniewicz A. M., Madej T., Ryniewicz W.: Modelowanie i symulacja kontaktu w endoprotezach stawu biodrowego. Referat wygłoszony na 8 Seminarium Naukowym „Mechanika w Medycynie”. Rzeszów 2006.
- [37] Ryniewicz A. M., Madej T.: Modeling and contact simulation in the endoprosthesis of hip joint. *ZEM* nr 4(148) 2006.
- [38] Ryniewicz A., Ryniewicz A., Madej T.: The analysis of stresses and translations in working zone of endoprosthesis of hip joint. *ZEM* nr 4(136), 2003.
- [39] Sęp J.: Modelowanie szczeliny smarowej i przepływu smaru w łożysku z czopem z powierzchniową warstwą dwuskładnikową. *ZEM* nr 4(132), 2002.
- [40] Sęp J.: Właściwości filmu olejowego w poprzecznych łożyskach ślizgowych z nietypową geometrią czopa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2006.
- [41] Sikora J., Kurzycki K.: Badania wpływu wybranych czynników na wytrzymałość zmęczeniową stopu łożyskowego. *Tribologia*, 3, 2005.

- [42] Starczewski Z.: Drgania układu asymetrycznego wirnika podpartego w łożyskach ślizgowych z pływającymi panewkami. *Tribologia*, 4, 2004.
- [43] Stasiak J. M.: Rozkład ciśnienia i nośność hydrodynamiczna w perycykloidalnym łożysku ślizgowym. *ZEM* nr 2(22), 1975.
- [44] Strzelecki S.: Charakterystyki cieplne łożysk ślizgowych 2-powierzchniowych. *Tribologia*, 1, 2007.
- [45] Sułek M. W., Jedynek H. R.: Wpływ oddziaływań plastycznych mikronierówności na opory ruchu przy tarcu suchym. *Tribologia*, 4, 2004.
- [46] Szczerek M.: *Tribologia w nowych obszarach badań i aplikacji*. *ZEM* nr 2(126), 2001.
- [47] Szkurlat J., Wójcicki R., Murdzia E.: Metoda obliczania poprzecznych łożysk ślizgowych w stacjonarnych warunkach tarcia mieszanego. *Tribologia*, 1, 2006.
- [48] Szkurlat J., Wójcicki R., Murdzia E.: Model fizyczno-matematyczny ślizgowego łożyska promieniowego dla warunków tarcia mieszanego. *Tribologia*, 4, 2004.
- [49] Świdorski W., Wójcicki R.: Przebieg i wpływ zużycia panewki na właściwości hydrodynamiczne łożysk ślizgowych. *Tribologia*, 5, 2004.
- [50] Trzos M.: Modele neuronowe do prognozowania właściwości przeciwzużyciowych olejów smarnych. *Tribologia*, 4, 2004.
- [51] Wasilczuk M.: Projektowanie hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z wykorzystaniem optymalizacji kształtu szczeliny smarowej. *ZEM* nr 1(145), 2006.
- [52] Wasilczuk M., Wodtke M.: Wpływ odkształceń tarczy oporowej wału na właściwości hydrodynamiczne łożyska wzdłużnego. *Tribologia*, 1, 2007.
- [53] Wierzholski K.: Analysis of the Solutions of Equations Describing a non-Newtonian Ferrofluid Flow in the Deformable Gap of Journal Bearing in a Magnetic Field. *ZEM*, nr 2 (42), 1980.
- [54] Wierzholski K., Miszczak A.: Pressure distributions for turbulent lubrication in ferrohydrodynamic bearings gap. *ZEM* nr 3(131), 2002.
- [55] Wierzholski K.: Computational studies of friction forces for hard tissue cultivation in bioreactor. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, 2(138), 2004.
- [56] Wierzholski K., Miszczak A.: Pressure distributions for turbulent lubrication in ferrohydrodynamic bearings gap. *ZEM* nr 3(131), 2002.
- [57] Wierzholski K.: Płaski przepływ oleju w poprzecznym łożysku ślizgowym. *ZEM* nr 2(18) 1974.
- [58] Wierzholski K.: The Effect of the Forces of Inertia and Variable Lubricant Viscosity on the Hydromagnetic nob-Isothermic Flow in Gap of Journal Bearing. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* z. 4 (36), 1978.
- [59] Wiśniewski M.: EHD lubrication of the worm gears teeth. *Tribologia*, 6, 2004.
- [60] Wodtke M.: Obliczeniowa weryfikacja parametrów konstrukcyjnych podpory hydrostatycznej. *Tribologia*, 4, 2004.
- [61] Wrona M.: Ilościowa analiza tekstury cząstek zużycia z wykorzystaniem komputerowej analizy obrazu. *Tribologia*, 4, 2006.
- [62] Wrona M.: Ocena możliwości zastosowania komputerowej analizy barwy do identyfikacji cząstek zużycia tribologicznego. *Tribologia*, 3, 2005.
- [63] Zwierzycki W., Stachowiak M.: Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do aproksymowania zużycia korozyjno-mechanicznego. *Mat. XXV Szkoły Tribologicznej, Łądek Zdrój*, 2002.

- [64] Żywica G.: Symulacyjne badanie wpływu pęknięcia konstrukcji podpierającej na stan dynamiczny łożyskowanego ślizgowo wirnika. *Tribologia*, 1, 2007.
- [65] <http://www.aoexpert.compl/>

Computer aided tribological research

S u m m a r y

In the paper, the the question of computer aid of national tribological investigations was introduced. The first uses of numeric techniques and the analysis of modern computer methods were presented. The contemporarily most current questions from this area are: modelling and the simulation of tribological processes, projecting materials for sliding joints, the development of methods of surface engineering, working out of prognose methods of tribological wear, the investigation of fluid friction processes and tribologi questions. Above-mentioned problems in years 2002–2007 in Poland were described in over 700 papers. A large majority computer technique was mainly used for succour of study results of realized investigations. The enough large area of uses of computer technique are: investigation stand control, registration of experimental results, registration of measurements data and the presentation of investigation results. Directed on computer simulation of phenomena and tribological processes works are present too. Number of works of this group has growed up for year 2006.

The examples of works illustrating possibilities and the use of chosen computer tools in article also were presented. On the base of achieved analyses was stated, that in Polish tribology in comparison with different fields of applied sciences, it is not the computer aids of scientific works so considerable. However appear the symptoms, that in near future situation will undergo significant improvement.