

Piotr KOWALEWSKI*

NUMERYCZNA ANALIZA ROZKŁADÓW NACISKU WYSTĘPUJĄCYCH W STANDARDOWYCH WĘZŁACH TRIBOLOGICZNYCH

NUMERICAL ANALYSIS OF CONTACT PRESSURE DISTRIBUTION IN STANDARD FRICTION NODES

Słowa kluczowe:

badania tribologiczne, metoda elementów skończonych, tarcie polimerów, rozkład nacisków

Key words:

tribological investigation, finite element method, friction of polymers, contact pressure distribution

Streszczenie

Praca zawiera opis badań numerycznych analizujących wybrane standardowe węzły tarcia. W ramach pracy w oparciu o metodę elementów skończonych opracowano modele numeryczne skojarzeń geometrycznych stosowanych w badaniach tarcia polimerów. Analizie poddano

* Politechnika Wroclawska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

węzły tarcia typu: tarcza–trzcienie, walec–trzcienie, płytko–klocek, walec–płytko. Na podstawie opracowanych modeli wyznaczone zostały rozkłady nacisków występujące na powierzchni tarcia poszczególnych układów. Przyjęte w modelu założenia i uproszczenia dotyczyły badań tarcia w skojarzeniu metal–polimer. Analizie poddano również wpływ wartości współczynnika tarcia, własności mechanicznych materiałów oraz wymiarów próbki na występujące rozkłady nacisków. Wyniki badań mogą być wykorzystane w dyskusji nad jakością tribologicznych badań eksperymentalnych.

WPROWADZENIE

Postęp techniczny wiąże się ze zmianami konstrukcji urządzeń technicznych, w tym również węzłów tarcia. Coraz częściej w urządzeniach mechanicznych można spotkać złożone i nietypowe węzły tarcia. Coraz większe znaczenie ma również dokładna znajomość charakterystyk tribologicznych tego typu układów. Pociąga to za sobą konieczność prowadzenia kompleksowych badań doświadczalnych w celu wyznaczenia dokładnych zależności pomiędzy parametrami tarcia, a jego wartościami dla określonych par trących. Większość istniejących stanowisk tribologicznych umożliwia prowadzenie badań tarcia z wykorzystaniem standardowych pod względem kształtu próbek.

W badaniach skojarzeń typu metal–polimer najczęściej wykorzystuje się pary trące, w których występujący styk rozłożony. Do najczęściej stosowanych w tego typu badaniach [L. 2–4, 6] można zaliczyć stanowiska typu:

- tarcza–trzcienie (pin-on-disc),
- walec–trzcienie,
- płytko–klocek.

Badaniom poddawane są również węzły ślizgowe, w których występuje styk skoncentrowany (polimerowe koła zębate, endoprotezy stawu kolanowego, prowadnice ślizgowe itp.) [L. 5]. Odwzorowaniem styku występującego w tego rodzaju węzłach tarcia jest m.in. układ typu walec–płytko. Stosowanie tego rodzaju skojarzeń służy częściej do badań zużycia niż wyznaczania charakterystyk $\mu = f(p, v)$.

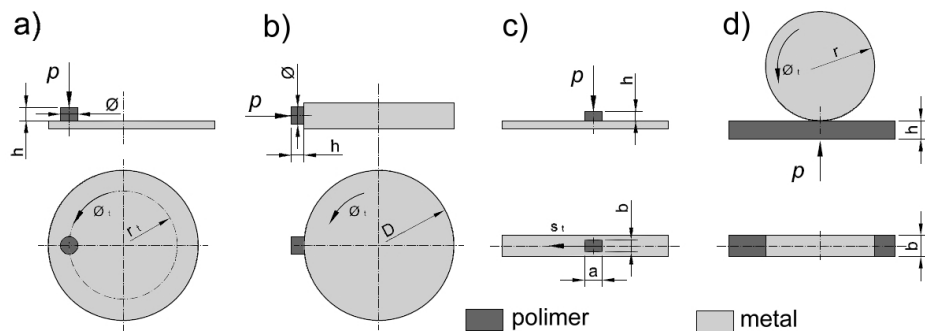
Należy podkreślić, iż w badaniach tribologicznych tworzyw sztucznych wykorzystuje się również inne rodzaje skojarzeń geometrycznych nieanalizowanych w niniejszej pracy.

Bardzo często, szczególnie w przypadku materiałów polimerowych, jednym z podstawowych parametrów tarcia jest nacisk jednostkowy p . Przy analizie wyników przyjmuje się, iż w trakcie tarcia nacisk występujący pomiędzy trącymi powierzchniami jest stały i niezmienny. Oczywiście jest jednak, że zarówno niedokładność geometryczna współpracujących elementów, jak i występująca siła tarcia wpływa na zmiany występującego nacisku.

Niniejsza praca przedstawia wyniki badań numerycznych, których celem było określenie zmian nacisków występujących pomiędzy trącymi powierzchniami dla różnych rodzajów skojarzeń geometrycznych. Dodatkowo w ramach badań numerycznych sprawdzono, jak na zmiany występującego nacisku wpływa wartość współczynnika tarcia, sztywność materiału polimerowego oraz wysokość próbek polimerowych.

PROGRAM BADAŃ I MODEL NUMERYCZNY

Badania przeprowadzono na czterech modelach numerycznych odtwarzających wybrane (wymienionych we wstępie) węzły tarcia. Modele różniły się kształtem elementów trących. Schematy kinematyczne analizowanych węzłów tribologicznych przedstawiono na **Rys. 1**.



Rys. 1. Schematy kinematyczne i wymiary skojarzeń geometrycznych przyjętych w modelu numerycznym. Typy węzłów tribologicznych: a) tarcza-trzpień, b) walec-trzpień, c) płytko-kłosek, d) walec-płytko

Fig. 1. Kinematics schemes and geometrical dimensions of analysed tribological nodes. Types of nodes: a) pin-on-disc, b) pin-on-cylinder, c) cube-on-plate, d) plate-on-cylinder

Przy wyznaczaniu rozkładów nacisków poprzez obliczenia numeryczne dla każdego skojarzenia geometrycznego przyjęto dwie różne war-

tości współczynnika tarcia: $\mu_1 = 0,2$ i $\mu_2 = 0,4$. Wartości te odpowiadają w przybliżeniu współczynnikom tarcia materiałów ślizgowych i ciernych podczas współpracy ze stalą. W opisywanych modelach numerycznych zmienne były również moduł sprężystości podłużnej ($E_1 = 1000$ MPa, $E_2 = 2000$ MPa) oraz wysokość próbek polimerowych ($h_1 = 5$ mm i $h_2 = 2,5$ mm).

W opisywanym modelu numerycznym wszystkie próbki obciążono na powierzchni górnej (równoległej do powierzchni tarcia) stałym naciskiem $p = 1$ MPa. W przypadku par trących w układzie tarcza–trzcienie (pin-on-disc) oraz walec–trzcienie przyjęto taką samą średnicę trzcienia $\Phi = 8$ mm. Pozostałe parametry dla tych węzłów tarcia to promień tarcia $r_t = 30$ mm i średnica przeciwpróbki walcowej $D = 200$ mm. Dla badań skojarzenia typu płytka–klocek wymiar próbki były następujące: długość $a = 9$ mm, szerokość (również dla pary walec–płytki) $b = 4$ mm.

Do opracowania modelu numerycznego oraz przeprowadzenia obliczeń wykorzystano pakiet Abaqus CAE 6.1.

W modelu numerycznym przyjęto wiele uproszczeń, takich jak:

- prowadzenie obliczeń statycznych – „quasi-dynamicznych”,
- zastosowanie modelu ciała idealnie sprężystego do opisu materiału polimerowego (lepkosprężystego),
- zastąpienie powierzchni przeciwpróbki metalowej przez nieodkształcalną powłokę,
- zmniejszenie drogi tarcia dla analizowanego ruchu.

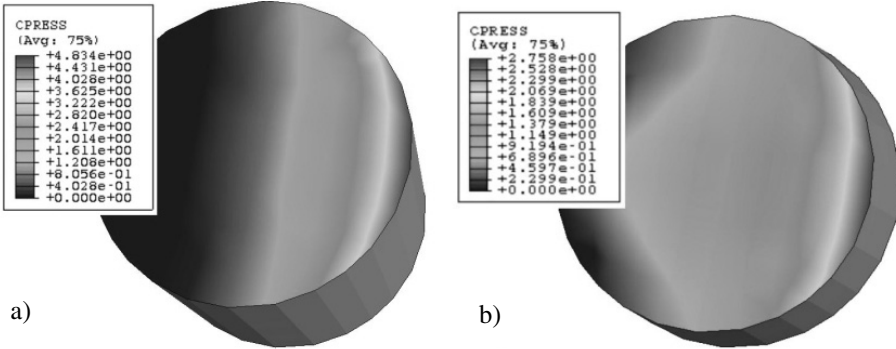
W obliczeniach numerycznych wykorzystano elementy skończone tetragonalne. Opracowany model numeryczny ze względu na porównawczy charakter badań nie został poddany weryfikacji doświadczalnej.

ANALIZA ROZKŁADU NACISKU W STREFIE STYKU

Rozkład nacisków występujący w strefie styku współpracujących elementów ma ogromne znaczenie dla wartości oporów tarcia [L. 1, 3, 4, 6–8] oraz zużywania się [L. 4, 6] materiałów trących. Przykład uzyskanych na podstawie symulacji numerycznych rozkładów nacisków na powierzchni trącej próbki przedstawiony został na **Rys. 2**.

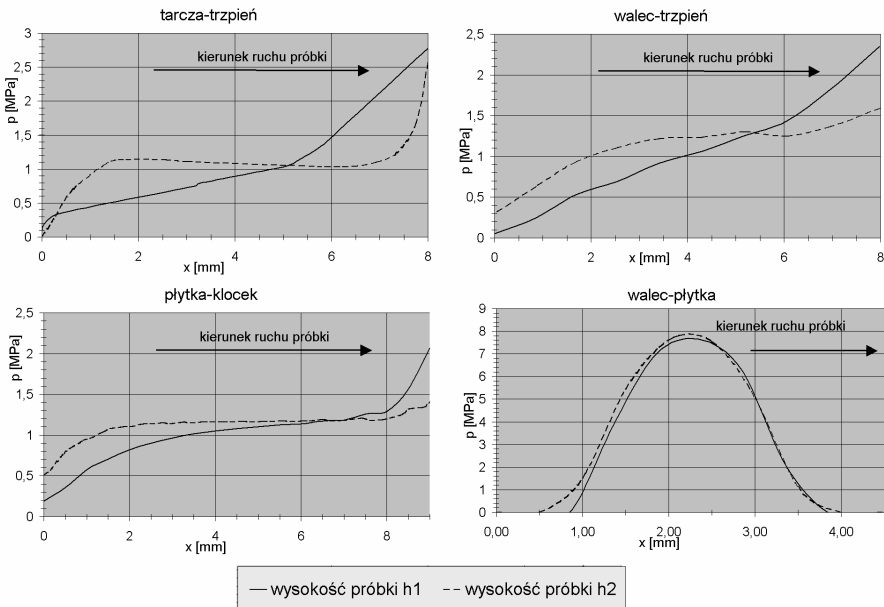
Wyniki symulacji zawierające wartości wyliczonych nacisków p_s (dla różnych wysokości próbek polimerowych) występujących na powierzchni styku podczas tarcia przedstawione zostały na **Rys. 3** w postaci wykresów. Prezentowane przebiegi zmian nacisków względem długości

x odnoszą się warstwy centralnej (płaszczyzny symetrii) równoległej do kierunku tarcia.



Rys. 2. Przykładowe rozkłady nacisków na powierzchni trącej próbki polimerowej skojarzenia geometrycznego typu walec-trzpień, wysokość próbki: a) $h_1 = 5$ mm, b) $h_2 = 2,5$ mm

Fig. 2. Example of contact stress distribution on friction surface for pin-on-disc friction node, highness of polymer sample: a) $h_1 = 5$ mm , b) $h_2 = 2.5$ mm



Rys. 3. Zmiany wyliczonych nacisków p_s występujących w strefie styku analizowanych węzłów tarcia. Porównanie wpływu zmiany wysokości h próbki polimerowej

Fig. 3. Comparison of contact pressure distribution for different friction nodes

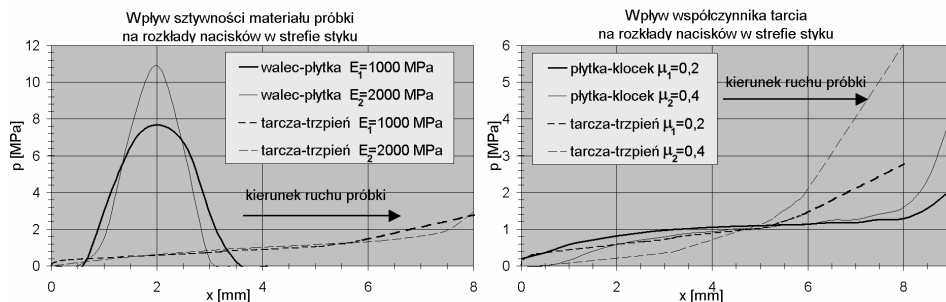
Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, iż wyraźnie widoczny jest wpływ wysokości próbki polimerowej na występujące naciski. Bardziej równomierne rozkłady nacisków występują dla próbek o mniejszej wysokości ($h_2 = 2,5$ mm).

Dla większości analizowanych skojarzeń geometrycznych można zauważyć znaczny wzrost nacisków w przedniej części próbki (bliżej „powierzchni natarcia”). Charakterystyczny jest również spadek nacisków występujący na „końcu” próbki polimerowej. W środkowej części próbki występuje natomiast obszar, o nacisku zbliżonym do nominalnego. Najbardziej korzystnymi skojarzeniami (dla poprawności wyników badań tribologicznych) są układy typu: płytko–klocek oraz tarcza–trzcina. Wyznaczone numerycznie naciski dla tych węzłów tarcia mają we wszystkich przypadkach najbardziej równomiernie rozłożone pola nacisków. Korzystniejsze rozłożenie nacisków p_s występujące w przypadku węzła tarcia typu płytko–klocek związane jest oczywiście ze znaczną różnicą stosunku długości do wysokości próbki w stosunku do pozostałych węzłów tarcia.

Obserwując rozkłady nacisków występujące w węźle tarcia typu walec–trzcina można zauważyć charakterystyczny nieregularny przebieg zmian nacisków. Zmiana nacisków na powierzchni tarcia w większości analizowanych przypadków ma charakter nieregularny, nie widać przedziału, w którym następowałaby „stabilizacja” analizowanych wartości. Jedynie dla małej wysokości próbki ($h_1 = 2,5$ mm) występujące naciski mają obszar o stałej wartości (**Rys. 3**). Przy zastosowaniu sztywniejszego ($E_2 = 2000$ MPa) materiału próbki dla tego węzła tarcia widoczny jest bardzo nieregularny rozkład nacisków.

Dla skojarzenia typu walec–płytko uzyskanie stałego nacisku na powierzchni trącej jest oczywiście nieosiągalne ze względu na występujący „styk skoncentrowany”. Przeprowadzone obliczenia wykazały jednak, iż z analizowanych parametrów największy wpływ na rozkłady nacisków w tego rodzaju węźle tarcia ma sztywność materiału polimerowego (**Rys. 4**). Koncentracja naprężeń przy module $E_2 = 2000$ MPa jest o kilkadziesiąt procent większa (**Rys. 4**).

Badania numeryczne wykazały, iż własności mechaniczne materiału polimerowego (moduł sprężystości podłużnej E) są jednym z podstawowych czynników zmieniających znacząco rozkłady nacisków w strefie styku.



Rys. 4. Wartości wyliczonych nacisków p_s występujących w strefie styku węzła tarcia typu walec–trzcienie. Naciski występujące w płaszczyźnie symetrii próbki równoległej do kierunku tarcia

Fig. 4. Value of calculated contact pressures p_s for different values of polymer stiffness and friction coefficient

Duże znaczenie, szczególnie w przypadku węzłów tarcia typu tarcza–trzcienie, płytka–klocek dla rozkładu nacisków ma wartość występującego współczynnika tarcia. Dla wartości $\mu_2 = 0,4$ lokalne spiętrzenia nacisków są większe niż w przypadku $\mu_1 = 0,2$ MPa (**Rys. 4**).

PODSUMOWANIE

Na podstawie otrzymanych rezultatów można stwierdzić, iż we wszystkich przypadkach bardzo wyraźne widoczne są zmiany nacisków występujące na obrzeżach strefy styku. Najmniej korzystnym dla prowadzenia badań tribologicznych w styku rozłożonym jest skojarzenie typu walec–trzcienie. Rozkłady nacisków na powierzchni trącej tego typu układu są bardzo zmienne, nawet w przypadku braku ruchu. Wynika to z faktu, iż powierzchnia tarcia nie jest płaszczyzną.

Można stwierdzić na podstawie analizy otrzymanych wyników, iż dla badanych skojarzeń geometrycznych najkorzystniejszym jest układ typu płytka–klocek. Rozkłady występujących nacisków dla obydwu wartości współczynnika tarcia mają względnie stały charakter, a występujące nierównomierności są w porównaniu z innymi układami najmniejsze.

W przeprowadzanych badaniach wykazano, iż wysokość próbki jest jedną z najważniejszych wielkości wpływających na rozkłady nacisków występujących w strefie tarcia węzłów tribologicznych. Dla uzyskania jak najbardziej równomiernych nacisków w strefie styku wysokość próbki polimerowej powinna być jak najmniejsza.

Analiza sztywności materiału polimerowego wykazała istotność wpływu tego parametru na występujące w strefie styku naciski. Szczególnie istotne znaczenie ma ten parametr w przypadku węzłów charakteryzujących się stykiem skoncentrowanym. Dla materiałów o zwiększonej sprężystości podłużnej występuje znaczne spiętrzenie nacisków na krawędziach próbki.

Należy zauważyć, iż w przeprowadzonym eksperymencie nie uwzględniono występującego zużywania materiałów trących. W czasie docierania próbek przed badaniami tribologicznymi następuje m.in. szybsze zużywanie materiału w miejscach zwiększonego nacisku, a co za tym idzie do częściowego zmniejszenia występujących spiętrzeń nacisków. Przeprowadzone badania wykazują jeszcze raz, iż prawidłowe prowadzenie badań tribologicznych w celu wyznaczenia charakterystyk tarcia i zużywania musi zostać poprzedzone docieraniem współpracujących elementów.

Zastosowanie metody elementów skończonych jest wygodnym narzędziem pozwalającym na szybkie oszacowanie zmian nacisków występujących podczas tarcia w strefie styku. Należy podkreślić jednak, iż wyniki analiz numerycznych bez weryfikacji doświadczalnej są mało wiarygodne.

LITERATURA

1. Blazquez, A., Paris, F., Canas, J., Interpretation of the problems found in applying contact conditions in node-to-point schemes with boundary element non-conforming discretizations, *Engineering Analysis with Boundary Elements* Volume: 21, Tom 4, 1998, s. 361–375.
2. Capanidis D.: Selectec aspects of the methodology of tribological investigation of polymer materials. *Archives of civil and mechanical engineering*, vol. VII, No. 4, Wrocław 2007.
3. Lawrowski Z.: *Bezobsługowe łożyska ślizgowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
4. Lawrowski Z.: *Tribologia*. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1985.
5. Kowalewski P., Wieleba W., Leśniewski T.: Stanowisko do badań tribologicznych w złożonym ruchu cyklicznym toczno-ślizgowym. *Tribologia*, R. 38, nr 2, (2007), 303–311.
6. Rymuza Z.: *Trybologia polimerów ślizgowych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986.

7. Wieleba W.: Metoda numeryczno-doświadczalna wyznaczania oporów tarcia w polimerowych łożyskach ślizgowych podczas rozruchu. Tribologia, R. 38, nr 3, (2007), 329–337.
8. Wieleba W. Kowalewski P.: Wykorzystanie metody elementów skończonych do wyznaczania momentu tarcia w polimerowym łożysku ślizgowym. Górnictwo Odkrywkowe, R. 48, nr 7/8, (2006), 179–182.

Recenzent:
Marek WIŚNIEWSKI

Summary

The paper describe method of modelling and analysing contact stress distribution in chosen tribological nodes. Analyses based on results from finite elements friction models. The experiment involves four different geometrical cases of friction nodes. There cases base on flat contact and one on concentrated contact. All friction nodes are using for testing metal-polymer friction couples. Investigation consider analysis for pin-on-disc, pin-on-cylinder, cube-on-plate and plate-on-cylinder geometrical shapes. Parameters of numerical models were coefficient of friction ($\mu_1 = 0.2$ and $\mu_2 = 0.4$), stiffness of polymer ($E_1 = 1000$ MPa and $E_2 = 2000$ MPa) and highness of polymer samples ($h_1 = 5$ mm, $h_2 = 2.5$ mm).

Results of investigation shows that highness of polymer samples is very important for contact stress distribution. Others parameter has also influence for properly contact. Very important for contact stress distribution is also running-in process which is necessary before doing experimental tribological tests. Results of experiments could be consider in the discussion of experimental tribological investigation and accuracy of experimental friction characteristics.