

AUTOREFERAT

1. **Imię i Nazwisko** — Oleksii Nosko.
2. **Posiadane dyplomy, stopnie naukowe** — z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej
 - magistra inżyniera:** Moskiewski Państwowy Uniwersytet Techniczny imienia N.E. Baumana, 2007 r., specjalność: *Komputerowe systemy wspomagające projektowanie*.
 - doktora nauk technicznych:** Moskiewski Państwowy Uniwersytet Techniczny imienia N.E. Baumana, 2010 r., specjalności: *Maszyny drogowe, budowlane oraz do podnoszenia i transportu; Tarcie i zużycie w maszynach*. Temat pracy: *Metoda obliczenia temperatury w obszarze kontaktu elementów par ciernych urządzeń hamulcowych maszyn do podnoszenia i transportu*, promotor: docent doktor nauk technicznych Aleksander Metodijewicz Romaszko.
 - doktora nauk technicznych:** Saitama University, 2013 r., temat pracy: *Effect of temperature on dynamic characteristics of a pad sliding on a disc*, promotor: prof. dr hab. Yuichi Sato.
3. **Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych / artystycznych**

01.10.2010 r. – 20.09.2013 r.	stypendysta, Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Japonia;
08.10.2013 r. – 30.08.2014 r.	docent, Wydział Mechaniczny, Wschodnioukraiński Uniwersytet Narodowy imienia Wołodymyra Dala, Ukraina;
01.09.2014 r. – 31.08.2016 r.	badacz, Department of Machine Design, KTH Royal Institute of Technology, Szwecja;
od 01.09.2016 r.	adiunkt, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2. ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

Moje osiągnięcie naukowe zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 r. (art. 16 ust. 2) stanowi jednotematyczny cykl artykułów pt. *Teoretyczna i doświadczalna ocena temperatury powierzchni tarcia oraz jej wpływ na stabilność poślizgu*. Cykl składa się z 6 publikacji (2 samodzielne i 4 we współautorstwie) w czasopismach znajdujących się w bazie *Journal Citation Reports*.

Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego stanowią:

- [1] O. Nosko (2016), Analytical study of sliding instability due to velocity- and temperature-dependent friction, *Tribology Letters*, 61, 1, IF 2015: 1,758.
- [2] O. Nosko, T. Nagamine, H. Mori, Y. Sato (2013), Theoretical study of thermofrictional oscillations due to negative friction-temperature characteristic, *Tribology International*, 61, 235–243, IF 2013: 2,124. (O. Nosko: udział 25%)
- [3] O. Nosko (2013), Partition of friction heat between sliding semispaces due to adhesion-deformational heat generation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 1189–1195, IF 2013: 2,522.
- [4] N.S. Belyakov, O. Nosko (2016), Analytical solution of non-stationary heat conduction problem for two sliding layers with time-dependent friction conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 98, 624–630, IF 2015: 2,857. (O. Nosko: udział 50%)
- [5] N.S. Belyakov, A.P. Nosko* (2010), Thermoelastic problem of friction of plane-parallel layers with allowance for nonstationarity of thermal processes, *Journal of Friction and Wear*, 31, 317–325, IF 2010: 0,204. (O. Nosko: udział 50%)
- [6] O. Nosko, T. Nagamine, A.L. Nosko, A.M. Romashko, H. Mori, Y. Sato (2015), Measurement of temperature at sliding polymer surface by grindable thermocouples, *Tribology International*, 88, 100–106, IF 2015: 2,259. (O. Nosko: udział 25%)

* Rosyjskim odpowiednikiem imienia jest 'Алексей Павлович'.

Wprowadzenie. Niestabilność poślizgu jest zjawiskiem mogącym występować w procesie względnego ruchu ciał w kontakcie. Zwykle towarzyszą jej niekontrolowane zmiany prędkości v_s oraz innych parametrów tarciovych. W układach ciernych, takich jak hamulce, sprzęgła i łożyska, powyższe zmiany powodują pogorszenie eksploatacyjnych charakterystyk — skrócenie czasu żywotności, obniżenie progu niezawodności, wystąpienie przedwczesnych awarii, pogorszenie wskaźników ergonomicznych, zakłócenie płynności ruchu, występowanie hałasu. W związku z powyższym, przewidywanie możliwości występowania niestabilności poślizgu jest niezbędnym warunkiem na etapie projektowania węzłów tarcia.

Wiadomo, że wzajemny związek pomiędzy współczynnikiem tarcia μ i prędkością v_s ma znaczący wpływ na charakter poślizgu. Jeżeli μ zmniejsza się przy zwiększeniu v_s , tzn. kąt nachylenia stycznej do wykresu zależności $\mu-v_s$ jest ujemny, to zachodzi ujemne tłumienie i związana z nim niestabilność poślizgu. Drgania mogą również występować z uwagi na różnice pomiędzy kinetyczną siłą tarcia, a maksymalną siłą styczną przy kontakcie statycznym, zgodnie z mechanizmem sprag-slip, ze względu na termosprężystą niestabilność kontaktu oraz samowzbudne sprężyste fale na powierzchni ślizgowej i inne.

Nagrzewanie tarciove powierzchni poślizgu powoduje wzrost jej temperatury T . Tak jak w przypadku ogólnym μ zależy od temperatury, to właśnie temperatura ma wpływ na dynamikę poślizgu. W większości przypadków taki wpływ ma charakter ilościowy. Na przykład wiadomo, że nagrzewanie pary cierniej hamulca ma wpływ na przebieg zmniejszania prędkości i czas zatrzymania. Udowodniono także wpływ jakościowy zależności $\mu(T)$ na dynamikę poślizgu. Kokonin i in. (2007) ustalili doświadczalnie, że w węglowych tarczach ciernych, stosowanych w układach hamulcowych samolotów, przy ujemnym nachyleniu $\mu - T$ może występować ślizganie oscylacyjne. Niestabilność poślizgu związana z temperaturą rozpatrywano w pracach Kensley i Iwasa (1980), Yen i Ishihara (1996), Venkataraman i Sundararajan (2002).

Należy zwrócić uwagę na to, że oprócz bezpośredniego wpływu (przez zmianę μ), temperatura może wpływać także pośrednio na stabilność poślizgu poprzez oddziaływanie na procesy tarciove takie jak zużycie powierzchni ciernych, zmiany cieplnych i mechanicznych właściwości powierzchni stycznych, powstanie powierzchniowych warstw, zmiany strukturalne oraz procesy chemiczne.

W kilku pracach wykonano badania teoretyczne dotyczące niestabilności poślizgu w zależności od $\mu(T)$. Maksimov i Rakhmanov (1987) rozpatrzyli poruszanie się ciała

względem kontrciała ze współczynnikiem tarcia μ zależnym od v_s i T . Na podstawie założenia o równomiernym rozkładzie temperatury w ciele ustalono, że niestabilność poślizgu może zachodzić w różnych postaciach: wspólny eksponencjalny wzrost v_s i T , zwiększenie ich oscylacji oraz drgania okresowe. W tych przypadkach ustalono warunki niestabilności, zawierające współczynniki nachyleń $\mu-v_s$ i $\mu-T$.

Nosonovsky i Bhushan (2009) badali termodynamikę tarcia i procesy samoorganizacji przy tarcii w oparciu o pracę Fox-Rabinovich i in. (2007). Przyjęto, że μ zależy od v_s i T , a przewodność cieplna — od v_s . Warunek stabilności zapisano w postaci wariacyjnej. Zgodny z nim układ cierny traci stabilność przy dodatnim nachyleniu $\mu-T$.

Mortazavi i in. (2012) analizowali niestabilność poślizgu spowodowaną dodatnim nachyleniem $\mu-T$. Element cierny był rozpatrywany jako jednowymiarowy klocek, a rozkład temperatury w nim został opisany analitycznie z uwzględnieniem wpływu nachylenia $\mu-T$ na generację ciepła na skutek tarcia. Ustalono warunek niestabilności stwierdzający, że temperatura T będzie zwiększać się eksponencjalnie, jeżeli współczynnik nachylenia $\mu - T$ przewyższy pewną wartość krytyczną, zależną od wymiarów klocka oraz współczynnika przewodności cieplnej materiału, z którego został wykonany.

Na podstawie wyżej wspomnianych badań, niestabilność poślizgu może się objawiać w postaci zwiększenia eksponencjalnego v_s lub nietłumionych drgań. Pierwszy rodzaj niestabilności prawdopodobnie zachodzi przy dodatnim nachyleniu $\mu-T$, a drugi — przy nachyleniu ujemnym. Przeprowadzona analiza literaturowa wykazała, że wspomniane wyżej koncepcje i modele nie są wzajemnie związane. *Brak jest jednolitego podejścia, pozwalającego na modelowanie różnych rodzajów niestabilności poślizgu, spowodowanej jednoczesnym oddziaływaniem prędkości i temperatury oraz ustalenie odpowiednich warunków niestabilności.*

Opracowanie i aplikacja praktyczna modeli cieplno-mechanicznych w celu prognozowania niestabilności poślizgu zależnej od temperatury mogą być z sukcesem wykonane tylko przy istnieniu sprawdzonych i wiarygodnych metod teoretycznego oraz doświadczalnego wyznaczenia temperatury na kontaktach ślizgowych.

W procesie tarcia mechaniczna energia ślizgających się ciał zamieniana jest w ciepło, które jest pochłaniane przez elementy pary cierniej, powodując ich nagrzewanie. Możemy sformułować następujące podstawowe prawa generacji ciepła podczas tarcia suchego:

- oddziaływanie mechaniczne i generacja ciepła zachodzą w mikroobszarach kontaktu oddzielnych chropowatości, lokalizacja i kształt obszarów kontaktu ciągle zmieniają się, ślizgające się powierzchni cierne w wyniku zużycia pozostają chropowatymi;
- ciepło jest generowane na trących się powierzchniach zgodnie z mechanizmem adhezyjnym, a w mikrowarstwach przypowierzchniowych według mechanizmu deformacyjnego;
- pomiędzy ślizgającymi się powierzchniami zachodzi kontaktowa wymiana ciepła;
- temperatury w obszarach kontaktu wykazują pierwszorzędny wpływ na współczynnik tarcia i inne charakterystyki, wpływ pola temperaturowego w pobliżu tych obszarów może również się objawiać poprzez zmianę właściwości materiałowych;
- prędkość poślizgu i siła docisku mają bezpośredni wpływ na współczynnik tarcia i inne charakterystyki, jak również mają pośredni wpływ poprzez zmianę mocy wytwarzania ciepła tarciovego;
- długotrwałe tarcie przy niezmiennych warunkach zewnętrznych prowadzi do równowagi termodynamicznej układu ciernego, przy której nie występują procesy spontaniczne, a makrocharakterystyki pozostają niezmiennie w czasie (tarcie ustalone);
- przy nie zrównoważonym stanie układu ciernego rozdzielenie ciepła pomiędzy ślizgającymi się ciałami zależy od właściwości chropowatej powierzchni, natomiast w stanie zrównoważonym o rozdzieleniu ciepła decydują głównie właściwości ciał.

Zagadnienie cieplne tarcia formułowane jest zwykle w postaci początkowo-brzegowego zagadnienia przewodnictwa cieplnego dla układu dwóch ciał ze źródłem ciepła na powierzchni ich kontaktu. Związek pomiędzy gradientami temperatury, tzn. strumieniami ciepła a gęstością mocy wytwarzania ciepła tarciovego q ustalają warunki brzegowe. Istnieje kilka głównych postaci warunków brzegowych, które szczegółowo będą omówione poniżej.

Blok (1937) dokonywał podziału ciepła tarciovego pomiędzy ślizgającymi się elementami za pomocą współczynnika rozdzielania strumieni ciepła α_f , który wyznacza część ciepła skierowaną do ciała pierwszego. Dalej takie warunki będziemy nazywać „warunkami wymuszonego rozdziału ciepła”. Następnie Ling (1959) sformułował

warunki doskonałego kontaktu cieplnego tarcia, oparte na bilansie energetycznym i ciągłości temperaturowej w mikroobszarach kontaktu wierzchołków chropowatości. Warunki doskonałego kontaktu cieplnego tarcia są również często zadawane w obszarze kontaktu makroskopowego (nominalnego).

Podstrigach (1963), analizując oddziaływanie cieplne dwóch ciał przez cienką warstwę pośrednią, zaproponował warunki niedoskonałego kontaktu cieplnego opisujące przewodność cieplną w warstwie za pomocą współczynnika kontaktowej wymiany ciepła γ . Niezależnie Barber (1970) i Protasov (1979) wyprowadzili warunki niedoskonałego kontaktu cieplnego z dwoma parametrami — współczynnikiem rozdzielenia energii tarcia α oraz wspomnianym wyżej współczynnikiem γ . Należy zaznaczyć, że propozycja Barbera opiera się na teorii przewodnictwa ciepła. Zasugerował on, że strumień ciepła, wnikający do każdego z ciał pary ciernej, zawiera dwie składowe: pierwsza jest spowodowana wytwarzaniem ciepła tarcowego, a druga wywołana różnicą temperatur tych ciał. Współczynnik α jest wyznaczany poprzez opory termiczne chropowatych powierzchni ciernych. Z drugiej strony, Protasov zbadął generację ciepła na skutek tarcia rozpatrując adhezyjno-deformacyjną interakcję chropowatości i uzasadnił swoją konkluzję zasadami termodynamiki. Wprowadził on współczynnik α jako część energii tarcia, która wytwarzana jest na powierzchni (mechanizm adhezyjny) lub w warstwie powierzchniowej (mechanizm deformacyjny) jednego z elementów pary ciernej.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że istnieje zasadnicza różnica pomiędzy α_f i α : pierwszy z nich decyduje o rozdzieleniu ciepła tarcowego, natomiast drugi zadaje podział mocy wytwarzania ciepła (q) pomiędzy ślizgającymi się ciałami.

Warunki niedoskonałego kontaktu cieplnego Barbera-Protasova są uogólnieniem wyżej wspomnianych warunków brzegowych w zagadnieniach cieplnych tarcia. W przypadku granicznym $\gamma = 0$ otrzymujemy z nich warunki wymuszonego podziału ciepła, przy $\gamma \rightarrow \infty$ stają się one warunkami doskonałego kontaktu cieplnego tarcia, a przy $\alpha = 1/2$ przechodzą one do wariantu Podstrigacha warunków niedoskonałego kontaktu cieplnego tarcia. Tak więc warunki brzegowe Barbera-Protasova pozwalają na opis z określonym stopniem dokładności wszystkich podstawowych zasad tarcia suchego. Szczególnie ważna jest ich zdolność do uwzględniania adhezyjno-deformacyjnej generacji ciepła i jego wymiany kontaktowej.

Jeżeli parametry tarcia, takie jak prędkość poślizgu i ciśnienie kontaktowe, zmieniają się w czasie, to powoduje to odpowiednie zmiany mocy wytwarzania ciepła tarcowego q

oraz współczynników α i γ . Z literatury naukowej wiadomo, że w przypadku ogólnym γ zależy od ciśnienia kontaktowego. Z kolei, w teoretycznej pracy Chantrenne i Raynaud (1997) ustalono, że oba współczynniki α i γ zależą od prędkości poślizgu. Tak więc, wielkości q , α i γ należy rozpatrywać jako zmienne.

Wykonano szereg badań analitycznych z wykorzystaniem metod transformacji całkowej Laplace'a, szeregów Fouriera i innych metod dotyczących wyznaczania rozkładów temperatur w ślizgających się ciałach. Istniejące metody matematyczne pozwalają otrzymać rozwiązania analityczne jednowymiarowych zagadnień cieplnych tarcia dla ciał w postaci półprzestrzeni lub warstw. Klasyczne rozwiązania dla półprzestrzeni z warunkami brzegowymi odpowiadającymi wymuszonemu rozdzieleniu ciepła lub doskonałego kontaktu cieplnego otrzymano w monografii Carslaw i Jaeger (1959). Wzory do obliczenia temperatury, powstałej na skutek tarcia w układach tribologicznych typu półprzestrzeń – półprzestrzeń, półprzestrzeń – warstwa, warstwa – warstwa, zostały otrzymane w pracach Grilitskii (1996), Matysiak i Yevtushenko (2001), Pauk (2005), Awrejcewicz i Pyr'yev (2009), Jewtuszenko i Kuciej (2010, 2012), Och (2015) z uwzględnieniem warunków brzegowych niedoskonałego kontaktu cieplnego tarcia w wariacie zaproponowanym przez Podstrigacha. Rozwiązania numeryczne zagadnień przestrzennych zaproponowano w pracach Ścieszka (1998), Wawrzonek i Białecki (2008), Grześ (2014), Adamowicz (2015) i in.

Przeprowadzona analiza literaturowa wykazała, że pomimo oczywistych zalet, warunki brzegowe Barbera-Protasova niedoskonałego kontaktu cieplnego tarcia, jak również i inne warunki stosowane do opisu adhezyjno-deformacyjnego mechanizmu generacji ciepła na skutek tarcia, nie znalazły szerokiego zastosowania aplikacyjnego. Tak więc, *opracowanie teoretycznych metod modelowania temperatury na ślizgających się powierzchniach z uwzględnieniem zmiennych w czasie adhezyjno-deformacyjnej generacji ciepła i kontaktowej wymiany ciepła ma duże znaczenie naukowe i praktyczne.*

Jakościowa i ilościowa adekwatność metod teoretycznych powinna być potwierdzona odpowiednimi danymi doświadczalnymi. Jak zaznaczono wyżej, procesy tarcia zachodzą w mikrowarstwach wierzchnich i tam należy mierzyć temperaturę. Tylko wtedy nadaje się ona na charakterystykę kontaktu ślizgowego. W tym celu opracowano różne metody pomiarowe. Do najbardziej rozpowszechnionych należą metoda termografii podczerwieni oraz metoda termopary.

Metoda termografii podczerwieni oparta jest na tym, że moc promieniowania zależy od temperatury. Czujnik podczerwieni skupia się na obszarze kontaktu przez

przezroczysty element cierny lub na powierzchni zlokalizowanej w pobliżu tego obszaru. Metoda termografii podczerwieni pozwala mierzyć temperaturę z wysoką częstotliwością i rozdzielczością (Oliferuk i in., 2000). Jednak wymaga przezroczystości co najmniej jednego elementu pary ciernej i w wielu przypadkach jest niewykonalna.

Metoda termopary opiera się na efekcie Seebecka, tzn. na bezpośredniej konwersji temperatury w napięcie elektryczne. Zwykle termopara jest montowana w stacjonarnym elemencie pary ciernej jak najbliżej powierzchni kontaktu. Im mniejsza jest spoina termopary, tym większa jest dokładność pomiarowa. Zostały opracowane różnorodne termopary miniaturowe. Najmniejszą z nich, prawdopodobnie, jest termopara cienko-foliowa, opracowana przez Tian, Kennedy i in. (1992) ze spoiną rzędu 1 μm w kierunku prostopadłym do powierzchni poślizgu. Tak małe termopary gwarantują dokładność pomiarów, ale ich żywotność jest bardzo krótka z powodu bardzo małej odległości pomiędzy spoiną a używaną powierzchnią cierną.

Inne podejście w ramach metody termopary polega na zastosowaniu termopar zużywalnych, które również są znane jako kontaktowe lub foliowe i były prawdopodobnie zastosowane po raz pierwszy przez Peklenik (1957). Dwubiegunowa termopara zużywalna składa się z dwóch izolowanych przewodów wstawionych do elementu ciernego i wychodzących swoimi końcami na powierzchnię poślizgu. Odształcenia cierne i nagrzewanie łączą przewody w spoinę. Tym samym taka termopara pozwala wykonywać pomiary w warunkach intensywnego zużycia. W przypadku metalowego elementu ciernego konstrukcja termopary zużywalnej upraszcza się na skutek wyłączenia jednego przewodu i stosowania zamiast niego samego elementu (jednobiegunowa termopara zużywalna).

Termopary zużywalne stanowią dobrą alternatywę dla czujników podczerwieni i miniaturowych termopar. Były one z sukcesem stosowane przez Nee i Tay (1981), Rowe i in. (1995), Babic i in. (2005), Batako i in. (2005), Lefebvre i in. (2006) do pomiaru temperatur szlifowanych próbek. Z drugiej strony, stosowanie ich do materiałów niemetalowych znacznie ograniczono. Jedną z głównych przyczyn tego jest różnica właściwości metali i materiałów niemetalowych. Ustalono doświadczalnie (Lebedev i in., 1973), że błąd pomiaru za pomocą termopary zużywalnej zależy od różnicy właściwości cieplno-fizycznych ślizgającego się elementu i przewodu termopary. Czym większa jest różnica, tym większy jest błąd pomiarowy. Oprócz tego, tarcie przewodu termopary po powierzchni próbki jakościowo różni się od tarcia po niej niemetalowego elementu. Wciągnięcie termopary do tarcia może powodować zakłócenia pola temperaturowego w

pobliżu spoiny termopary. Podsumowując należy stwierdzić, że *w celu rozszerzenia obszaru stosowalności termopar zużywalnych na materiały niemetaliczne należy rozwiązać problem interpretacji sygnału temperaturowego takiej termopary.*

Cel i główne zadania badawcze. Głównym celem moich badań było ustalenie i analiza wpływu temperatury na inicjację niestabilności poślizgu w oparciu o opracowanie i wdrożenie nowych teoretycznych i doświadczalnych metod wyznaczania temperatury w obszarach suchego tarcia. W metodzie teoretycznej przy formułowaniu zagadnień cieplnych tarcia stosuje się warunki brzegowe Barbera-Protasova niedoskonałego kontaktu cieplnego tarcia. Metoda doświadczalna przewiduje pomiary temperatury za pomocą termopar zużywalnych. Główne zagadnienia pracy zostały sformułowane w następującej postaci:

- znaleźć i przeprowadzić analizę warunków pojawiania się niestabilności poślizgu z uwzględnieniem jednoczesnego działania czynników prędkości i temperatury;
- otrzymać i dokonać analizy rozwiązań analitycznych dotyczących temperatur oraz współczynnika rozdzielania strumieni ciepła dla ślizgających się ciał z uwzględnieniem zmieniającego się z czasem adhezyjno-deformacyjnego wytwarzania ciepła oraz jego wymiany kontaktowej;
- zbadać możliwości i ustalić ograniczenia zastosowania termopar zużywalnych do pomiaru temperatur na powierzchniach ciernych.

Opis najważniejszych otrzymanych rezultatów. Problem ustalenia warunków (kryteriów) niestabilności poślizgu został rozwiązany teoretycznie. Zbadano ruch ciała w układzie ciernym o jednym stopniu swobody [1]. Zagadnienie początkowe dla równania ruchu sformułowano z uwzględnieniem zależności współczynnika tarcia μ od prędkości poślizgu v_s i nieustalonej temperatury powierzchniowej T ciała. Rozwiązanie zagadnienia otrzymano za pomocą przekształcenia całkowego Laplace'a w postaci szeregu ze składnikami zawierającymi funkcję gamma. Przeprowadzona analiza wykazała, że niestabilność poślizgu może się objawiać w postaci odchylenia ciała od pozycji równowagi lub jego drgań. Każdy rodzaj niestabilności poślizgu zaprezentowano w postaci obrazu lokalizacji biegunów funkcji przenoszenia w płaszczyźnie zespolonej. Ustalono warunki niestabilności zawierające współczynniki nachyleń $\mu-v_s$ i $\mu-T$. Zgodnie z nimi, dodatnie nachylenie $\mu-T$ powoduje odchylenie ciała od położenia równowagi. Zwiększającemu się wraz ze wzrostem nachylenia $\mu-T$ odchyleniu mogą towarzyszyć zwiększające się fluktuacje. Przy ujemnym nachyleniu $\mu-T$ mogą wystąpić oba rodzaje

niestabilności poślizgu. Wykazano również, że ruch ciała z ostrym ujemnym nachyleniem $\mu-T$ zbiega się z ruchem ciała przy ujemnym współczynniku nachylenia $\mu-v_s$, równym wartości bezwzględnej stosunku współczynnika tarcia do prędkości ustalonego ruchu. Wykonana analiza porównawcza wykazała, że warunki niestabilności zgadzają się ze znanymi teoretycznymi koncepcjami, opracowanymi w pracach Maksimov i Rakhmanov (1987), Nosonovsky i Bhushan (2009), Mortazavi i in. (2012), Sextro (2007).

Opisane wyżej warunki niestabilności otrzymano przy rozpatrzeniu małych odchyłeń ciała od położenia równowagi ustalonego ruchu, co odpowiada początkowemu okresowi ruchu ciała. Ustalone drgania w układzie o jednym stopniu swobody, spowodowane ujemnym nachyleniem $\mu-T$ zbadano w artykule [2]. Formułowanie zagadnienia jest podobne do poprzedniego, ale przy założeniu możliwości przylepiania ciała do przeciwpróbki (tzw. stan "stick"). Odkryto cztery rodzaje ustalonych drgań: stick-slip, stick-slip-slip-II, slip-slip-II oraz stick-slip-slip-II z wyraźną fazą slip-II, gdzie "slip" oznacza stan, w którym prędkość przeciwpróbki jest wyższa od prędkości ciała, a "slip-II" odpowiada stanowi przeciwnemu. Przeprowadzono analizę wpływu parametrów wejściowych na inicjację i rodzaj drgań. Pokazano, że niektóre z otrzymanych rezultatów jakościowo są podobne do rezultatów zawartych w pracach Leine i in. (1998), Galvanetto i Bishop (1999), Nakano i Maegawa (2009).

Zastosowanie warunków niestabilności zakłada posiadanie ocen współczynników nachylenia $\mu-v_s$ i $\mu-T$. Jednym z głównych czynników, wpływających na współczynniki, jest temperatura. Zostało sformułowane zagadnienie cieplne tarcia dla dwóch ślizgających się półprzestrzeni [3]. Założono, że ciepło jest generowane na skutek tarcia na powierzchniach ciernych według mechanizmu adhezyjnego, a w powierzchniowych warstwach zgodnie z mechanizmem deformacyjnym. Gęstość objętościowa mocy wytwarzania ciepła wg mechanizmu deformacyjnego w każdym ciele zmniejsza się eksponencjalnie wraz z oddaleniem od powierzchni poślizgu. Z wykorzystaniem transformacji całkowitej Laplace'a otrzymano wzory do znalezienia powierzchniowych temperatur i współczynnika rozdzielenia strumieni ciepła α_f . Analiza asymptotycznych i szczególnych przypadków wykazała, że konfiguracja generacji ciepła i intensywności kontaktowej wymiany ciepła wpływają na rozdzielenie ciepła przy małych liczbach Fouriera (Fo), a przy dużych Fo rozdzielenie ciepła pomiędzy trącymi się ciałami odbywa się zgodnie z proporcją efuzyjności cieplnej. Przy małych Fo w przypadku generacji ciepła wg mechanizmu deformacyjnego temperatura powierzchniowa rośnie

proporcjonalnie do F_0 , a przy mechanizmie adhezyjnym — proporcjonalnie do $\sqrt{F_0}$. Przeanalizowane zostały właściwości doskonałego kontaktu cieplnego. Ustalono, że przy adhezyjno-deformacyjnym sposobie wytwarzania ciepła na skutek tarcia, doskonałemu kontaktowi cieplnemu towarzyszy zmiana w czasie rozdzielania ciepła pomiędzy ciałami. Zostało również zbadane pole temperaturowe oraz rozdzielanie ciepła w przypadku półprzestrzeni ślizgającej się po innej półprzestrzeni o stałej temperaturze. Wykazano, że strumień ciepła na powierzchni półprzestrzeni może zmieniać swój kierunek.

W przypadku ogólnym parametry tarcia, takie jak prędkość poślizgu i ciśnienie kontaktowe, mogą zmieniać się z czasem. Skutkiem tego są zmiany mocy wytwarzania ciepła oraz współczynników rozdzielania energii tarcia α i kontaktowej wymiany ciepła γ . W celu zbadania wpływu współczynników α i γ na temperaturę sformułowano jednowymiarowe zagadnienie nieustalonego przewodnictwa cieplnego dla dwóch warstw z warunkami brzegowymi niedoskonałego kontaktu cieplnego Barbera-Protasova przy uwzględnieniu zmiany czasowej współczynników α i γ [4]. Analityczne rozwiązanie zagadnienia otrzymano za pomocą specjalnie skonstruowanej transformaty całkowitej względem zmiennej przestrzennej. W odróżnieniu od powszechnie stosowanych transformat, np. Laplace'a lub Fouriera, zaproponowana transformata może być stosowana do iloczynu dwóch funkcji zmiennej czasowej. Przeprowadzona analiza wykazała znaczący wpływ zmiennych w czasie współczynników α i γ na rozdzielanie ciepła pomiędzy warstwami. W przypadkach szczególnych otrzymane rozwiązanie jest zbieżne z rozwiązaniami otrzymanymi wcześniej w pracach Carslaw i Jaeger (1959), Grilitskii (1996), Pyr'yev (2002), Yevtushenko i Kuciej (2010, 2012).

Podczas obliczeń temperaturowych węzłów tarcia często niezbędnym jest posiadanie wiedzy o naprężeniowo-odkształceniowym stanie ślizgających się elementów i intensywności procesów zużycia ciernego. W tym celu sformułowano zagadnienia nieustalonego przewodnictwa cieplnego z warunkami brzegowymi Barbera-Protasova na powierzchni kontaktu dla dwóch warstw i niesprężonej quasi ustalonej termosprężystości z uwzględnieniem zużycia ciernego [5]. Sformułowane w ten sposób zagadnienia sprowadzono do równania całkowitego Volterra drugiego rodzaju względem ciśnienia kontaktowego. Na podstawie otrzymanego rozwiązania analitycznego tego równania wykonano analizę stabilności cieplno-mechanicznej kilku różnych układów cieplnych. Pokazano, że w przypadkach szczególnych parametrów z otrzymanego rozwiązania dostajemy rozwiązania z prac Aleksandrov i Annakulova (1990), Grilitskii (1996).

Weryfikacja otrzymanych rozwiązań i znalezionych na ich podstawie rozkładów temperatury może być wykonana za pomocą porównania tej ostatniej z temperaturą, zmierzoną na powierzchniach ciernych. Jak zaznaczono wyżej, jedną z perspektywicznych metod, pozwalających na pomiary temperatury mikrowarstw powierzchniowych, jest metoda termopary zużywalnej. Wykonano badania doświadczalne w celu ustalenia możliwości i ograniczeń takich termopar, stosowanych w materiałach niemetalowych, ślizgających się po powierzchni czołowej stalowej tarczy kołowej [6]. Zaprojektowano i wykonano dwa typy termopar zużywalnych na podstawie pary chromel–alumel z izolacją poliamidową oraz pary chromel–copel z filizolacją miki. Grubość folii termo elektrodowych była równa 60 μm dla termopary chromel–alumel i 20 μm dla termopary chromel–copel. Przetestowano dwa materiały cierne o nazwach kodowych SFP04 i 145-40 w zestawieniu z tarczą ze stali S275. Materiał SFP04 wykorzystuje się na nakładki hamulcowe pojazdów silnikowych, a materiał 145-40 stosuje się na elementy cierne w hamulcach i tarczach pojazdów silnikowych oraz maszyn do podnoszenia i transportu. Badania przeprowadzono na maszynie tarciowej typu trzpień-tarcza przy nacisku kontaktowym 0,1–0,3 MPa oraz prędkości poślizgu 1,1–6,6 m/s. Próbkę miała kształt sześciangu o boku 1 cm. Sygnał T_s od termopary zużywalnej był przetwarzany przez system akwizycji danych o częstotliwości do 100 kHz. Ustalono, że na skutek tarcia termopary o powierzchnię tarczy T_s często zawyża temperaturę T_b powierzchni poślizgu. Dolna granica T_s jest taka sama jak T_b . Badania doświadczalne przeprowadzono w trzech trybach poślizgu: stabilny, niestabilny (spowolnienie) i oscylujący. Ustalono, że w przypadku stabilnego poślizgu temperatura T_b może być wyznaczona jako dolna obwodowa T_s . Ta ostatnia może być skonstruowana za pomocą znalezienia punktów minimum lokalnego sygnału temperaturowego i usuwania wierzchołków temperaturowych związanych z tymi punktami. Dokładność wyznaczenia temperatury zwiększa się wraz ze zwiększeniem trwałości pomiaru. Przykładowo, dokładność 5% była osiągana podczas przetwarzania sygnału w czasie około 100 s. Przy poślizgu niestabilnym należało przeprowadzić liczne doświadczenia w jednakowych warunkach i połączyć sygnały temperaturowe w sygnał kombinowany. Wraz ze zwiększeniem liczby eksperymentów dolna obwodowa sygnału kombinowanego zbliża się do T_b . Temperaturowe sygnały, otrzymane w wyniku przeprowadzenia około 20 badań, pozwalają na dokładne wyznaczenie T_b . Podczas poślizgu oscylującego zaobserwowano przesunięcie fazowe pomiędzy przemieszczeniem stycznym powierzchni

ciernej próbki, a sygnałem temperaturowym. Ustalono, że takie przemieszczenie może być wykorzystane do znalezienia grubości spoiny termopary.

Najważniejsze wyniki. Na podstawie analitycznych rozwiązań zagadnień cieplnych tarcia z warunkami niedoskonałego kontaktu cieplnego Barbera-Protasova oraz doświadczalnych pomiarów temperatury w obszarach kontaktu ciernego, przeprowadzono systemowe badania wpływu temperatury na inicjację niestabilności poślizgu. Najważniejsze rezultaty badań mogą być podsumowane następująco.

1. Ustalono warunki do prognozowania niestabilności poślizgu. Są one oparte na wyrażeniu analitycznym, opisującym ruch ciała w układzie o jednym stopniu swobody dookoła położenia równowagi ustalonego poślizgu, w którym współczynnik tarcia μ zależy od prędkości poślizgu v_s i temperatury T . Zgodnie z warunkami niestabilności dodatnie nachylenie $\mu-T$ powoduje odchylenie ciała od położenia równowagi. Takie odchylenie wzrasta wraz ze zwiększeniem współczynnika nachylenia $\mu-T$. Temu procesowi mogą towarzyszyć zwiększające się drgania. Przy ujemnym nachyleniu $\mu - T$ niestabilność poślizgu może występować w dwóch postaciach w zależności od współczynników nachylenia $\mu-v_s$ i $\mu-T$, a mianowicie: odchylenie ciała od położenia równowagi oraz drgania.
2. Otrzymano wzory w postaci analitycznej do wyznaczenia powierzchniowych temperatur i współczynnika rozdzielania strumieni ciepła dla ślizgających się półprzestrzeni z uwzględnieniem adhezyjno-deformacyjnego mechanizmu generacji ciepła na skutek tarcia oraz kontaktowej wymiany ciepła. Ustalono, że przy małych liczbach Fouriera (Fo) rozdzielanie ciepła zależy od konfiguracji wytwarzania ciepła i intensywności jego wymiany kontaktowej, a przy dużych wartościach Fo takie rozdzielanie zachodzi zgodnie z proporcją efuzyjności cieplnej. Przy małych wartościach Fo powierzchniowe temperatury rosną proporcjonalnie do Fo w przypadku deformacyjnej generacji ciepła oraz jako \sqrt{Fo} przy nagrzewaniu tarciovym wg mechanizmu adhezyjnego.
3. Otrzymano analityczne rozwiązanie początkowo-brzegowego zagadnienia przewodnictwa cieplnego dla dwóch ślizgających się półprzestrzeni z warunkami niedoskonałego kontaktu cieplnego Barbera-Protasova z uwzględnieniem zmiany w czasie współczynników rozdzielania energii tarcia oraz kontaktowej wymiany ciepła. Wykazano, że profile czasowe tych parametrów mają wpływ na rozdzielanie ciepła.

4. Zbadano możliwości i ustalono ograniczenia stosowania termopar zużywalnych do pomiarów temperatury niemetalowych materiałów ślizgających się po tarczy wykonanej z metalu. Analiza sygnału temperaturowego T_s od termopary zużywalnej wykazała, że w wyniku tarcia termopary o powierzchnię tarczy T_s na ogół zawyża temperaturę T_b powierzchni ciernej. Dolna granica T_s jest taka sama jak T_b . W przypadku stabilnego poślizgu T_b może być znaleziona jako dolna obwodowa T_s . Ta ostatnia może być wyznaczona za pomocą ustalenia punktów minimum lokalnego na T_s i usunięcia szczytów temperaturowych związanych z tymi punktami. Dokładność wyznaczenia temperatury zwiększa się wraz ze wzrostem czasu pomiaru. Podczas niestabilnego poślizgu należy przeprowadzić liczne doświadczenia dla jednakowych warunków, a następnie połączyć sygnały temperaturowe w jeden sygnał kombinowany. Wraz ze zwiększeniem ilości eksperymentów dolna obwodowa kombinowanego sygnału zbliża się do rzeczywistej wartości temperatury T_b .

Znaczenie aplikacyjne. Wdrożenie otrzymanych rezultatów w praktyce może mieć potencjalnie znaczący wpływ na rozwój technologiczny i przemysłowy.

1. Ustalone warunki niestabilności można stosować do prognozowania inicjacji i intensywności tarciovych drgań i hałasu w układach hamulcowych środków transportu, w tym samochodów osobowych, ciężarowych, maszynach do podnoszenia i transportu, pociągów i samolotów. Są one szczególnie ważne przy intensywnym trybie hamowania, gdy temperatura staje się czynnikiem decydującym.
2. Otrzymane wzory analityczne pozwalają na bardziej precyzyjne oszacowanie temperatury i strumieni ciepła w elementach układów ciernych takich jak hamulce, sprzęgła, łożyska. W przypadkach szczególnych mogą one być stosowane do rozwiązania zagadnień izolacji cieplnej (kontakt statyczny).
3. Rezultaty związane z interpretacją sygnału temperaturowego termopary zużywalnej pozwalają rozszerzyć obszar stosowania metody termopary zużywanej na niemetalowe materiały cierne. Powoduje to bardziej precyzyjne prognozowanie zależnych od temperatury charakterystyk układów ciernych, w tym współczynnika tarcia, wpływającego na pojawienie się drgań i hałasu, intensywności zużycia, intensywności emisji pyłu, pojawiającego się podczas tarcia, właściwości cieplno-fizycznych i mechanicznych stosowanych materiałów. W przypadku udanego

wdrożenia metoda termopary zużywanej może stać się standardowym narzędziem do pomiaru temperatury na kontaktach ciernych.

Znaczenie naukowe. Wpływ otrzymanych rezultatów na rozwój nauki jest następujący:

1. Ustalono warunki niestabilności uwzględniające wpływ czynników prędkości i temperatury. Mogą one stanowić podstawę do opracowania nowych modeli teoretycznych pozwalających na prognozowanie niestabilności poślizgu, uwzględniających inne czynniki.
2. Otrzymano wzory analityczne do wyznaczania temperatur w ślizgających się ciałach oraz współczynnika rozdzielania strumieni ciepła pomiędzy nimi, uwzględniając zmienne w czasie adhezyjno-deformacyjne wytwarzanie ciepła na skutek tarcia i kontaktową wymianę ciepła. Mogą one zostać wykorzystane do opracowania nowych modeli generacji i rozdzielania ciepła na kontaktach ciernych. Dodatkowo, wspomniane wyżej wzory pozwalają na wykonanie analizy parametrycznej, jak również na przeprowadzenie badań asymptotycznych i przypadków szczególnych oraz testowania algorytmów numerycznych.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (artystycznych)

W latach 2014–2016 byłem zatrudniony na stanowisku badacza w Department of Machine Design, KTH Royal Institute of Technology. Moje badania były częścią Rebrake Project (FP7-PEOPLE-2012-IAPP), finansowanego ze środków Komisji Europejskiej. Głównym celem projektu było opracowanie rozwiązań dążących do zmniejszenia do 2020 roku o połowę emisji pyłu podczas eksploatacji hamulców pojazdów. Redukcja emisji pyłu jest ważna z punktu widzenia ochrony środowiska.

Razem z kolegami z zespołu badałem emisję pyłu przez materiały cierne o niskiej zawartości metali i organicznych materiałów nieazbestowych, które są szeroko stosowane jako komponenty układów hamulcowych samochodów osobowych. Testy zostały przeprowadzone na maszynie tarciowej typu trzpień-tarcza znajdującej się wewnątrz szczelnej komory. Powietrze w pomieszczeniu było wychwytywane przez wentylator i podawane do komory przez filtr. Tak więc, komora eliminowała zewnętrzne źródła pyłu. Cząstki pyłu powstałe w wyniku tarcia próbki i tarczy były następnie przeniesione poprzez powietrze do otworu wylotowego. Wychodzący z komory pył analizowano przy użyciu różnych narzędzi do pomiaru aerozoli. Po jego osadzeniu na filtrach, zbierano je do późniejszej analizy mikroskopowej i chemicznej. Cząsteczki pyłu analizowano w

zakresie średnic od 1,3 nm do 10 μm i wszechstronnie scharakteryzowano z punktu widzenia ilościowego i masowego stężenia, rozkładu wielkości cząstek, ich składu pierwiastkowego, kształtu, gęstości i porowatości. Najważniejsze rezultaty badań są następujące:

- ilościowy odsetek 1,3–4,4 nm cząstek jest znaczny i może przekraczać 80% w temperaturze powyżej 160 °C;
- ilościowy odsetek cząstek o średnicy mniejszej niż 100 nm wynosi prawie 100% w temperaturze powyżej 160 °C;
- rozkład wielkości cząstek wykazuje piki przy 0,19, 0,9 i 1,7 μm ; w temperaturze powyżej 160 °C piki pojawiają się w zakresie od 1,3 do 34 nm;
- udział masowy cząstek ze średnicą mniejszą niż 100 nm stanowi kilkadziesiąt procent w temperaturze powyżej 200 °C;
- cząstki o średnicach 0,1–0,6 μm mają różne kształty: płatków, zaokrąglony, iglasty i aglomerowany; liczbowy odsetek płatkowych cząstek wynosi około 60%;
- gęstość materiału cząstek o rozmiarze 0,06–10 μm wynosi $2,6 \pm 0,5 \text{ g/cm}^3$, a efektywna gęstość cząstek o rozmiarze 0,006–10 μm wynosi $0,75 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$;
- porowatość cząstek o rozmiarze 0,3–6,2 μm równa się $9 \pm 6\%$; zaobserwowano również cząsteczki bez porowatości, podobnie jak i cząstki o porowatości powyżej 20%.

Wyniki badań są przydatne do dokładnego przewidywania zachowań cząstek uwalnianych podczas pracy hamulców do atmosfery i następnie do ludzkiego układu oddechowego. Będą one wykorzystane przy efektywnej konfiguracji i użyciu urządzeń do uzdatniania powietrza oraz narzędzi do pomiaru aerozoli. Ponadto otrzymane wyniki wskazują, że podczas przeprowadzania badań środowiskowych i tribologicznych szczególną uwagę należy poświęcić emisji cząstek hamulcowych o średnicy mniejszej niż 5 nm.

Literatura

- Adamowicz, A. (2015) Axisymmetric FE model to analysis of thermal stresses in a brake disk, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 53 (2), 409–420.
- Aleksandrov, V.M., Annakulova, G.K. (1990) Contact problem of thermoelasticity by considering the wear and heat generation processes caused by friction, *Journal of Friction and Wear*, 11 (1), 24–28. (in Russian)
- Awrejcewicz, J., Pyr'yev, Y. (2009) *Nonsmooth dynamics of contacting thermoelastic bodies*, Springer.
- Babic, D., Murray, D.B., Torrance, A.A. (2005) Mist jet cooling of grinding processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 1171–1177.
- Barber, J.R. (1970) The conduction of heat from sliding solids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 13 (5), 857–869.
- Batako, A.D., Rowe, W.B., Morgan, M.N. (2005) Temperature measurement in high efficiency deep grinding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 1231–1245.
- Blok, H. (1937) Theoretical study of temperature rise at surfaces of actual contact under oiliness lubricating conditions, *General Discussion on Lubrication Vol. 2*, Institution of Mechanical Engineers, London, 222–235.
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. (1959) *Conduction of heat in solids*, 2nd ed., Oxford University Press, London.
- Chantrenne, P., Raynaud, M. (1997) A microscopic thermal model for dry sliding contact, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40 (5), 1083–1094.
- Fox-Rabinovich, G., Veldhuis, S.C., Kovalev, A.I., Wainstein, D.L., Gershman, I.S. et al. (2007) Features of self-organization in ion modified nanocrystalline plasma vapor deposited AlTiN coatings under severe tribological conditions, *Journal of Applied Physics*, 102, 074305.
- Galvanetto, U., Bishop, S.R. (1999) Dynamics of a simple damped oscillator undergoing stick-slip vibrations, *Meccanica*, 34, 337–347.
- Grilitskii, D.V. (1996) *Thermoelastic contact problems in tribology*, Institute of topics and methods of teaching, Kyiv. (in Ukrainian)
- Grześ, P. (2014) Numerical analysis of temperature field in a disc brake at different cover angle of the pad, *Acta Mechanica et Automatica*, 8 (4), 185–188.
- Kensley, R.S., Iwasa, Y. (1980) Frictional properties of metal insulator surfaces at cryogenic temperatures, *Cryogenics*, 20, 25–36.
- Kokonin, S.S., Kramarenko, E.I., Matveenko, A.M. (2007) *Basis of projecting aircraft wheels and braking systems*, Moscow Aviation Institute Publisher, Moscow. (in Russian)
- Lebedev, V.G., Kochetkov, A.M., Zhabokritskiy, R.A. (1973) Assessing ground-surface contact temperature using grindable thermocouples, *Machine Tools*, No. 9, 29. (in Russian).
- Lefebvre, A., Vieville, P., Lipinski, P., Lescalier, C. (2006) Numerical analysis of grinding temperature measurement by the foil/workpiece thermocouple method, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1716–1726.
- Leine, R.I., Van Campen, D.H., De Kraker, A., Van Den Steen, L. (1998) Stick-slip vibrations induced by alternate friction models, *Nonlinear Dynamics*, 16, 41–54.
- Ling, F.F. (1959) A quasi-iterative method for computing interface temperature distributions, *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*, 10 (5), 461–474.
- Maksimov, I.L., Rakhmanov, A.L. (1987) The thermofrictional oscillations under sliding, *Physics Letters A*, 121 (8), 399–402.

- Matysiak, S.J., Yevtushenko, A.A. (2001) On heating problems of friction, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 39 (3), 577–588.
- Mortazavi, V., Wang, C., Nosonovsky, M. (2012) Stability of frictional sliding with the coefficient of friction depended on the temperature, *Journal of Tribology*, 134 (4), 041601.
- Nakano, K., Maegawa, S. (2009) Safety-design criteria of sliding systems for preventing friction-induced vibration, *Journal of Sound and Vibration*, 324, 539–555.
- Nee, A.Y.C., Tay, A.O. (1981) On the measurement of surface grinding temperature, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 21, 279–291.
- Nosonovsky, M., Bhushan, B. (2009) Thermodynamics of surface degradation, self-organization and self-healing for biomimetic surfaces, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 367, 1607–1627.
- Och, E. (2015) Solving nonlinear thermal problems of friction by using method of lines, *Acta Mechanica et Automatica*, 9 (1), 33–37.
- Oliferuk, W., Kruszka, L., Nowacki, W.K. (2000) Measurements of temperature during dynamic shear deformation of carbon steel, *Journal De Physique. IV: JP*, 10 (9), 243–248.
- Pauk, W. (2005) Some contact problems of deformable solids, *Kielce University of Technology Publishing House, Kielce*. (in Polish)
- Peklenik, J. (1957) Ermittlung von geometrischen und physikalischen Kenngrößen für die Grundlagenforschung des Schleifens [dissertation], TH Aachen, Aachen. (in German).
- Podstrigach, Y.S. (1963) The temperature field in a system of rigid bodies coupled by thin interface, *Journal of Engineering Physics*, 6 (10), 129–136. (in Russian)
- Protasov, B.V. (1979) Energy proportions in a tribosystem and prognostication of its service durability, *Saratov University Publisher, Saratov*. (in Russian)
- Pyr'ev, Y.O. (2002) Investigation of the contact interaction between two layers with regard for the temperature dependence of friction and wear coefficients, *Journal of Mathematical Sciences*, 109 (1), 1257–1265.
- Rowe, W.B., Black, S.C.E., Mills, B., Qi, H.S., Morgan, M.N. (1995) Experimental investigation of heat transfer in grinding, *CIRP Annals*, 44 (1), 329–332.
- Ścieszka, S. (1998) Friction brakes, *Institute for Sustainable Technologies Publishing House, Radom*. (in Polish)
- Sextro, W. (2007) Dynamical contact problems with friction: models, methods, experiments and applications, 2nd ed., *Springer, Berlin*.
- Tian, X., Kennedy, F.E., Deacutis, J.J., Henning, A.K. (1992) The development and use of thin film thermocouples for contact temperature measurement, *Tribology Transactions*, 35 (3), 491–499.
- Venkataraman, B., Sundararajan, G. (2002) The influence of sample geometry on the friction behaviour of carbon-carbon composites, *Acta Materialia*, 50, 1153–1163.
- Wawrzonek, L., Białecki, R.A. (2008) Temperature in a disk brake, simulation and experimental verification, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 18 (3–4), 387–400.
- Yen, B.K., Ishihara, T. (1996) On temperature-dependent tribological regimes and oxidation of carbon-carbon composites up to 1800 °C, *Wear*, 196, 254–262.
- Yevtushenko, A.A., Kuciej, M. (2010) Influence of the convective cooling and the thermal resistance on the temperature of the pad/disc tribosystem, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (4), 337–342.
- Yevtushenko, A.A., Kuciej, M. (2012) The thermal problem of friction for two plane-parallel strips, *Numerical Heat Transfer Part A*, 61, 764–785.