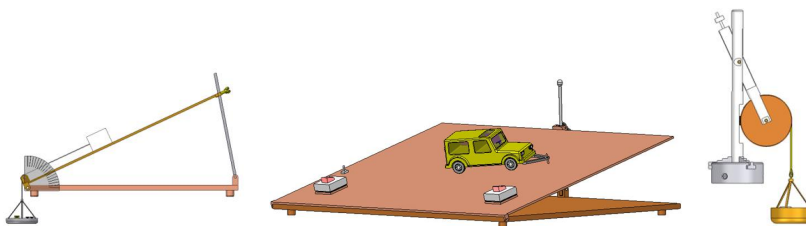


Ćwiczenie 1



BADANIE ZJAWISKA TARCIA

1.1. Cel ćwiczenia

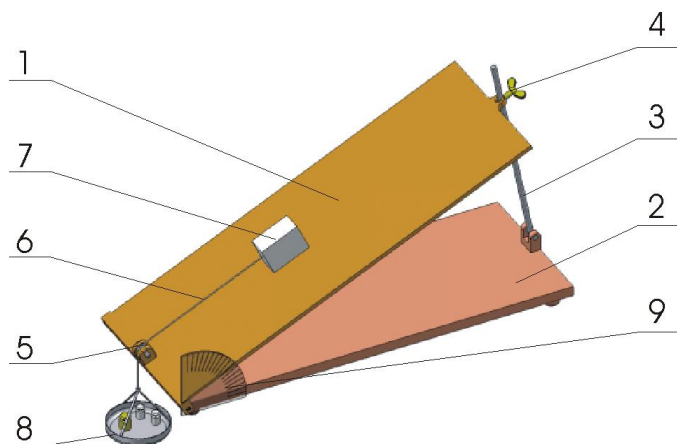
Celem ćwiczenia jest obserwacja efektów działania sił tarcia statycznego i kinetycznego w prostych układach. W szczególności jest nim eksperymentalne wyznaczenie współczynników tarcia statycznego pomiędzy kostką i płaszczyzną, krążkiem i płaszczyzną oraz wiotkim cięgnem i nieruchomym walcem, a także wyznaczenia momentu oporów tarcia na osi i momentu oporu łożyska kulkowego.

1.2. Wprowadzenie

Kierunek i zwrot siły tarcia poślizgowego określone są różnie w zależności od tego czy ruch stykających się ciał ma się dopiero rozpocząć, czy też już trwa. W pierwszym przypadku siła tarcia jest przeciwna do zamierzonego przesunięcia, w drugim natomiast jest ona przeciwna do prędkości względnej ślizgających się ciał. Pojawienie się ruchu nie tylko może zmieniać kierunek siły tarcia, ale także jej wartość. W trakcie tego ćwiczenia można będzie zaobserwować działanie sił tarcie w kilku różnych jakościowo sytuacjach.

1.3. Opis stanowiska badawczego

Ćwiczenie przeprowadzane jest na czterech stanowiskach. Widok pierwszego z nich, używanego do wyznaczenia współczynnika tarcia statycznego pomiędzy sztywną kostką i płaską powierzchnią przedstawiono na rys. 1.1.



Rys. 1.1. Stanowisko do pomiaru współczynnika tarcia statycznego

Płyta (1) może być ustawiana pod dowolnym kątem do poziomej podstawy (2) za pomocą prowadnicy (3) i zaciśku ze śrubą (4). Przez krążek (5) przerzucona jest cienka wiotka linka (6). Jeden jej koniec jest doczepiony do kostki (7) umieszczanej na płycie, natomiast na drugim końcu zawieszany jest pojemnik (8) z obciążnikami. Badane są trzy kostki prostokątne o tych samych wymiarach i zbliżonych masach, ale różniące się stanem i rodzajem powierzchni kontaktu – są to mianowicie: 1 - teflon, 2 - stal, 3 - guma. Kąt nachylenia płyty mierzony jest za pomocą kątomierza (9) umocowanego do ramy stoiska. Do wyznaczania masy obciążników używana jest waga laboratoryjna.

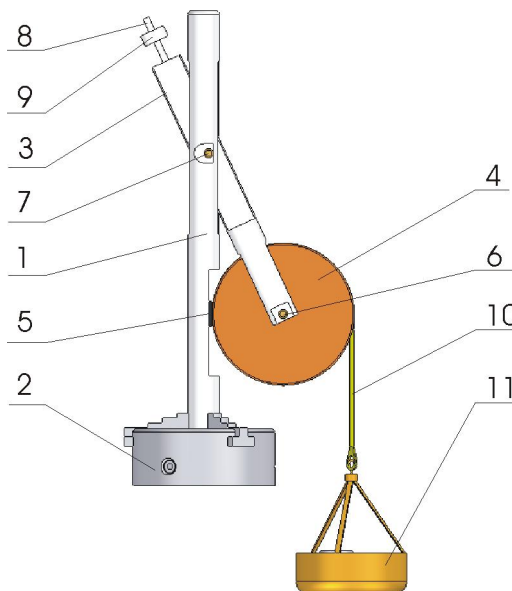
Na rys. 1.2 pokazany jest widok drugiego stanowiska do wyznaczania współczynnika tarcia pomiędzy linką i nieruchomym krążkiem, jak również momentu oporów krążka ruchomego.



Rys. 1.2. Stanowisko do badania tarcia cięgien i momentów oporu

Zasadnicze elementy tego stanowiska stanowi sześć - wykonanych z różnych materiałów - nieruchomych krążków i jeden krążek ruchomy. Krążki: (1) - drewniany, (2) - tekstolitowy, (3) -teflonowy, (4) i (5) - mosiężne mają taką samą średnicę **58 mm**, natomiast krążek mosiężny (6) ma średnicę **20 mm**. Wszystkie one są umocowane na stałe do ramy (8). Z kolei wykonany z mosiądzu krążek (7) ma także średnicę **58 mm**, ale dzięki osadzeniu go za pomocą łożyska kulowego na umocowanej w ramie poziomej osi może się on obracać. Dowolnie wybrane krążki można opasywać lekką, wiotką linką (9). Na jednym jej końcu zawieszony jest ciężarek (10) o masie **100 g**, natomiast do drugiego końca linki jest uczeplony pojemnik (11) - również o masie **100 g**. Napelniając pojemnik obciążnikami możliwe jest wywołanie ślizgania się linki po krążku nieruchomym lub też spowodowanie obrotu krążka ruchomego.

Na rys. 1.3 pokazany jest widok trzeciego stanowiska do wyznaczania momentu oporów tarcia osi oraz współczynnika tarcia pomiędzy krążkiem i nieruchomym klockiem.

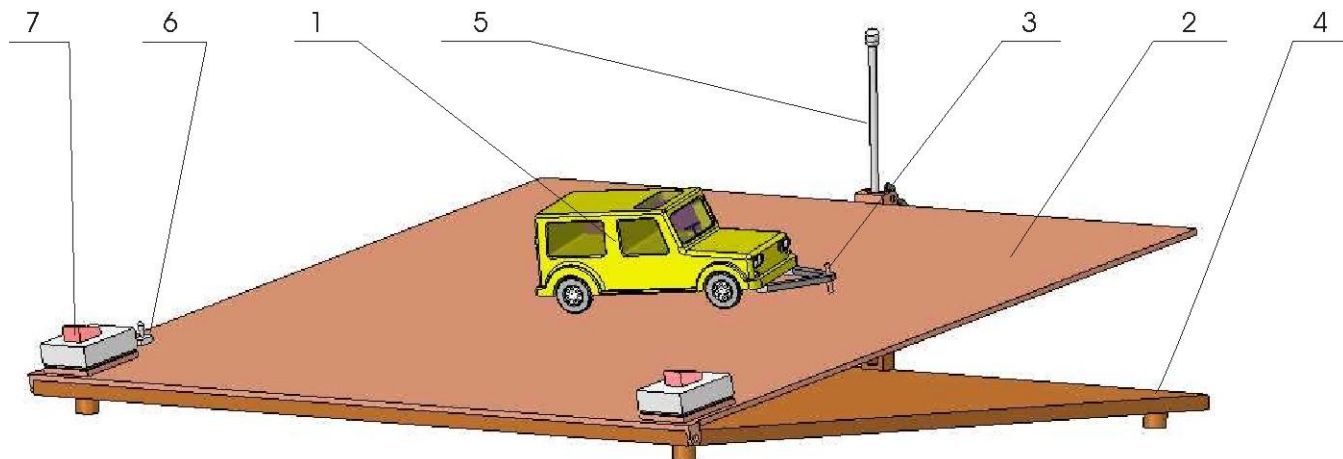


Rys. 1.3. Stanowisko do badania tarcia między krążkiem i klockiem

Zasadnicze elementy tego stanowiska stanowią: stojak (1) z podstawą (2), pręt (3), krążek (4) i klocek (5). Pręt może się obracać wokół poziomej osi (7) zamocowanej w stojaku. Na jednym końcu pręta znajduje się śruba (8) z mosiężną nakrętką (9) służącą do zrównoważenia pręta. Wykonany z tekstolitu krążek (4) jest ułożyskowany na

poziomej osi (6) umieszczonej na drugim końcu pręta. Krążek ma promień $r = 100 \text{ mm}$ i masę $M = 690 \text{ g}$. Można na niego nawijać lekką, wiotką linkę (10). Jeden jej koniec jest zamocowany do krążka, natomiast do drugiego końca linki jest uczepiony pojemnik (11) o masie $m_p = 100 \text{ g}$. Napełniając pojemnik obciążnikami możliwe jest spowodowanie ruchu krążka względem wymiennego klocka (5), mocowanego w zagłębieniu stojaka.

Na rys. 1.4 pokazany jest widok czwartego stanowiska, w postaci modelu samochodu (1) ustawionego na płycie (2), którą można odchylać od poziomej podstawy (4).



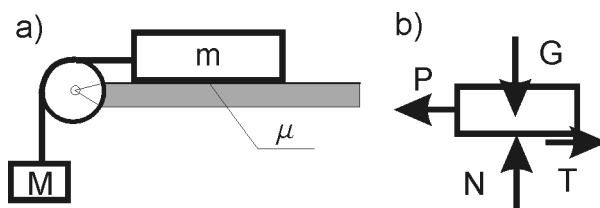
Rys. 1.4. Stanowisko do badania tarcia kinetycznego

W kontakcie z płytą pozostają jedynie tylne, napędzane koła samochodu. Przednia jego oś jest uniesiona, a samochód zamocowany jest w sposób umożliwiający jedynie obrót jego bryły wokół osi (3) prostopadłej do powierzchni płyty. Kąt pochylenia płyty może być płynnie zmieniany. Prowadnica (5) z zaciskiem umożliwia ustalenieżądanego nachylenia płyty względem poziomym. Przełącznik (6) służy do zmiany kierunku obrotu kół, natomiast przycisk (7) uruchamia napęd tylnych kół samochodu.

1.4. Teoretyczny opis zjawiska

1.4.1. Wyznaczanie współczynnika tarcia statycznego

Rozważmy układ przedstawiony na rys. 1.5a złożony z kostki o masie m (ciężarze $G = m g$) umieszczonej na poziomej powierzchni i do której doczepiono linkę z zawieszonym na niej ciałem o masie M (ciężarze $Q = M g$). Zbadajmy równowagę kostki, na którą działa pionowa siła ciężkości G i pozioma siła P oraz siły reakcji chropowatego podłoża N i T (rys. 1.5b).



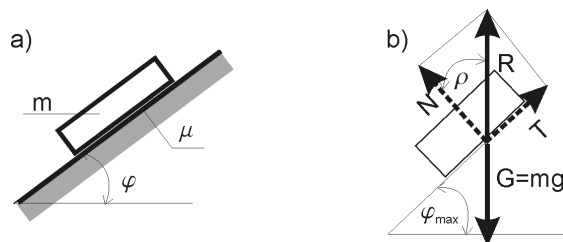
Rys. 1.5. Schemat układu: kostka na poziomej płaszczyźnie

Znając wartość siły $P = Q$, przy której następuje ruch kostki określa się współczynnik tarcia statycznego z następującego wzoru:

$$m = \frac{P}{G} = \frac{M}{m}. \quad (1.1)$$

Rozważmy teraz kostkę spoczywającą na powierzchni nachylonej do poziomu (rys. 1.6a). Zwiększając stopniowo kąt nachylenia powierzchni φ możemy spowodować ruch (ześlizgiwanie się) kostki.

Siły działające na kostkę w położeniu równowagi granicznej pokazane są na rys. 1.6b.



Rys. 1.6. Schemat układu: kostka na równi pochylej

Maksymalna wartość tego kąta, dla której kostka pozostaje w spoczynku jest równa kątowi tarcia statycznego ρ

$$\tan \rho = \mu = \tan \varphi_{\max} \quad (1.2)$$

Z powyższego wzoru możemy wyznaczyć współczynnik tarcia statycznego μ .

Weźmy teraz pod uwagę wiotkie cięgno opasujące nieruchomy krążek, jak pokazano na rys.1.7.



Rys. 1.7. Schemat układu: wiotkie cięgno opasujące krążek

Związek pomiędzy wartością napięć w dwóch częściach cięgna w stanie równowagi granicznej (cięgno zamierzałoby zacząć się ślizgać po krążku w lewo) jest dany zależnością

$$\frac{S_2}{S_1} = e^{\mu \alpha} \quad (1.3)$$

gdzie μ - współczynnik tarcia statycznego, α - kąt opasania (wyrażony w *radianach*), e - podstawa logarytmu naturalnego ($e = 2,718$), S_1 - napięcie w części, która opiera się, S_2 - napięcie w części, która ciągnie.

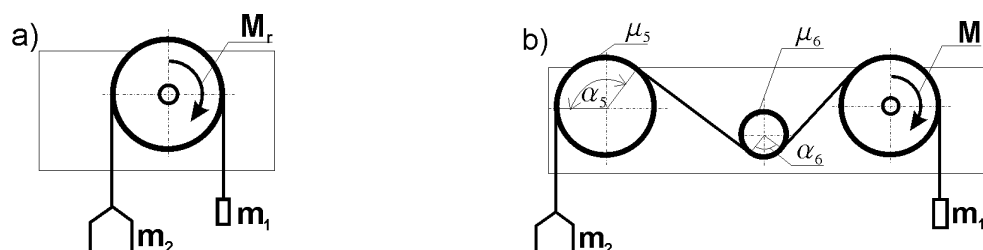
Należy zauważyć, że w przypadku istnienia poślizgu można stosować powyższy wzór, ale należy wstawić współczynnik tarcia kinetycznego μ_k .

Mierząc wartości sił S_1 i S_2 można wyznaczyć współczynnik tarcia statycznego; $S_1 = m_1 g$ oraz $S_2 = m_2 g$, gdzie g - przyspieszenie ziemskie, m_1 i m_2 - odpowiednio masy ciężarka i pojemnika z obciążnikami

$$\mu = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{S_2}{S_1} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{m_2}{m_1} \quad (1.4)$$

Znając wartości sił S_1 i S_2 można także wyznaczyć moment oporu łożyska M_r podpierającego krążek ruchomy 7 (rys.1. 8a)

$$M_r = (S_2 - S_1)R = (m_2 - m_1)R g \quad (1.5)$$



Rys.1.8. Konfiguracja układu: a) moment oporu łożyska;
b) linka opasująca krążki nieruchome 5, 6 oraz ruchomy 7 (patrz rys. 1.2)

Wykorzystując znajomość współczynników tarcia μ_5 i μ_6 oraz moment oporu M_r można wyznaczyć minimalną wartość masy m_2 dla znanej wartości masy m_1 (rys.1.8b odnoszący się do stoiska z rys. 1.2).

Rozważmy teraz zależności geometryczne rozpatrywanego układu przedstawionego na rys.1.9.

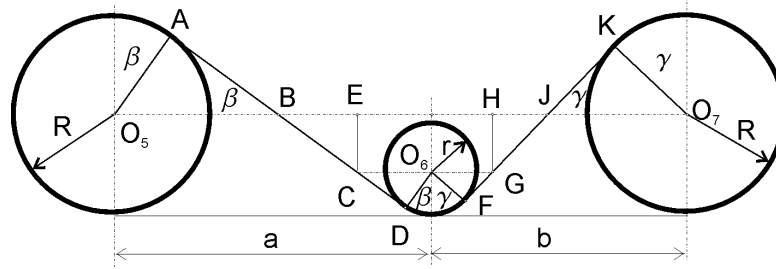


Fig.1.9. Wymiary i kąty analizowanego układu

Wobec istnienia następujących zależności $O_5B + BE + CO_6 = a$ oraz $O_6G + HJ + JO_7 = b$ otrzymuje się poniższe równania dla określenia b i g :

$$\frac{R}{\sin b} + \frac{(R-r)}{\operatorname{tg} b} + \frac{r}{\sin b} = a \quad \text{oraz} \quad \frac{R}{\sin g} + \frac{(R-r)}{\operatorname{tg} g} + \frac{r}{\sin g} = b.$$

Rozwiązania tych równań są następujące:

$$\operatorname{tg} \frac{b}{2} = \frac{a \sqrt{a^2 - 4Rr}}{2r}, \quad \operatorname{tg} \frac{g}{2} = \frac{b \sqrt{b^2 - 4Rr}}{2r}. \quad (1.6)$$

Kąty opasania α_5 oraz α_6 odpowiednio krążków 5 oraz 6 będą wynosić, zatem

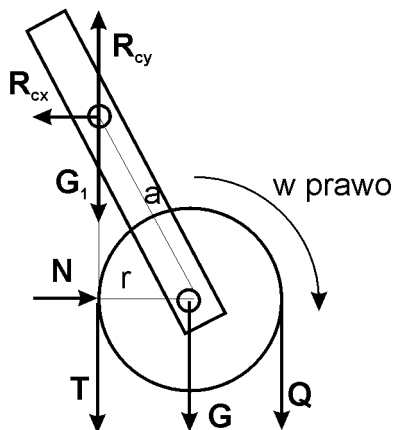
$$a_5 = \frac{p}{2} + b \quad a_6 = b + g.$$

W rezultacie minimalna masa m_2 dana jest zależnością

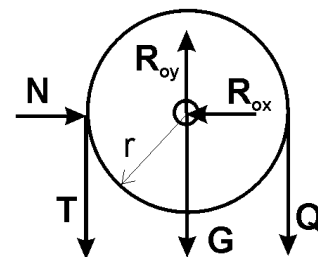
$$m_2 = \left(m_1 + \frac{M_r}{gR} \right) e^{[m_5 a_5 + m_6 a_6]}. \quad (1.7)$$

Rozważmy teraz układ przedstawiony na rys. 1.10 (dotyczy stoiska z rys. 1.3).

a)



b)



Rys. 1.10. Schemat układu - zamierzony ruch w prawo: a) pręt z krążkiem, b) sam krążek

Niech pręta ma ciężar G_1 , krążek ciężar $G = M g$ natomiast pojemnik zawieszony na nawiniętej na krążek linie ciężar $Q = m g$.

Zbadajmy równowagę graniczną układu przy zamierzonym ruchu krążka w *prawo*. Podukład złożony z pręta z krążkiem (rys. 1.10a) obciążony jest siłami ciężkości pręta G_1 , krążka G i pojemnika Q , siłą reakcji łożyska R_O ,

i siłami reakcji chropowatego klocka N i T . Na sam krążek (rys. 1.10b) działają natomiast siły ciężkości G i Q , reakcje N i T i reakcja łożyska R_C .

Dla analizowanych podukładów uzyskuje się następujące równania równowagi:

$$\sum_i M_{iC} : -Gr - Q2r + N\sqrt{a^2 - r^2} = 0 \quad (1.8)$$

$$\sum_i M_{iO} : -Qr + Tr = 0. \quad (1.9)$$

W stanie równowagi granicznej istnieje dodatkowa zależność dotycząca siły tarcia:

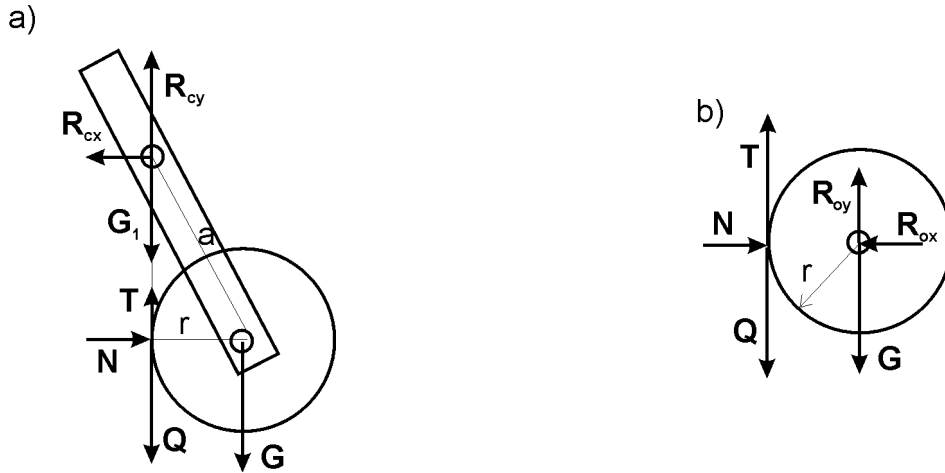
$$T = mN ,$$

gdzie μ jest współczynnikiem tarcia.

Znajdując wartość siły Q , przy której następuje ruch krążka w *prawo* określa się współczynnik tarcia statycznego z następującego wzoru:

$$m = \frac{Q}{G + 2Q} \sqrt{\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 1} = \frac{m}{M + 2m} \sqrt{\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 1}. \quad (1.10)$$

W przypadku zamierzonego ruchu krążka w *lewo* mamy do czynienia z podukładami przedstawionymi na rysunku 1.11.



Rys. 1.11. Schemat układu - zamierzony ruch w lewo: a) pręt z krążkiem, b) sam krążek

W tym przypadku uzyskuje się następujące równania równowagi:

$$\sum_i M_{iC} : -Gr + N\sqrt{a^2 - r^2} = 0, \quad (1.11)$$

$$\sum_i M_{iO} : Qr - Tr = 0. \quad (1.12)$$

W stanie równowagi granicznej istnieje dodatkowa zależność dotycząca siły tarcia:

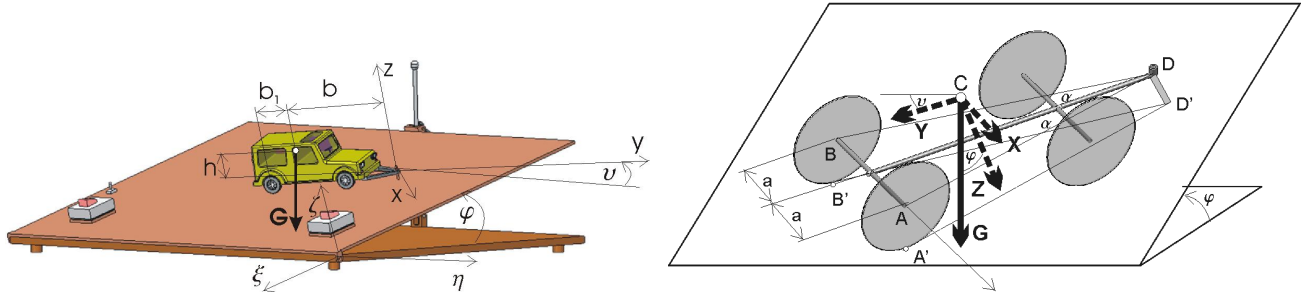
$$T = mN .$$

Znajdując wartość siły Q , przy której następuje ruch krążka w *lewo* określa się współczynnik tarcia statycznego z następującego wzoru:

$$m = \frac{Q}{G} \sqrt{\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 1} = \frac{m}{M} \sqrt{\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 1}. \quad (1.13)$$

1.4.2. Analiza sił tarcia działających na koła samochodu

Jak wspomniano już wcześniej (przy opisie stanowiska) w kontakcie z podłożem pozostają jedynie tylne (napędzane) koła samochodu. Przód pojazdu jest lekko uniesiony, a samochód zamocowany jest w sposób umożliwiający jedynie obrót jego bryły wokół osi z prostopadłej do podłoża (połączenie przegubowe w punkcie D).



Rys. 1.12. Schemat układu: wymiary i składowe siły ciężkości

Płaszczyzna ABD (zawierająca osie kół) jest tylko nieznacznie odchylona od płaszczyzny podłoża A'D'B, zatem różnica pomiędzy kątami: A'D'B' i ADB (kąt ADB = 2α) jest do zaniedbania. Kąt α jest określony następującą zależnością wynikającą z geometrii układu:

$$\sin \alpha = \frac{a}{\sqrt{a^2 + (b + b_1)^2}},$$

gdzie: a, b, b₁ podobnie jak występujące dalej r są wymiarami pokazanymi na rysunku 1.12.

Lokalny (ruchomy) układ odniesienia xyz jest związany z samochodem natomiast układ ξηζ jest związany z płaszczyzną płyty. Dla u = 0 osie x, y i z są równoległe odpowiednio do osi ζ, η i ζ.

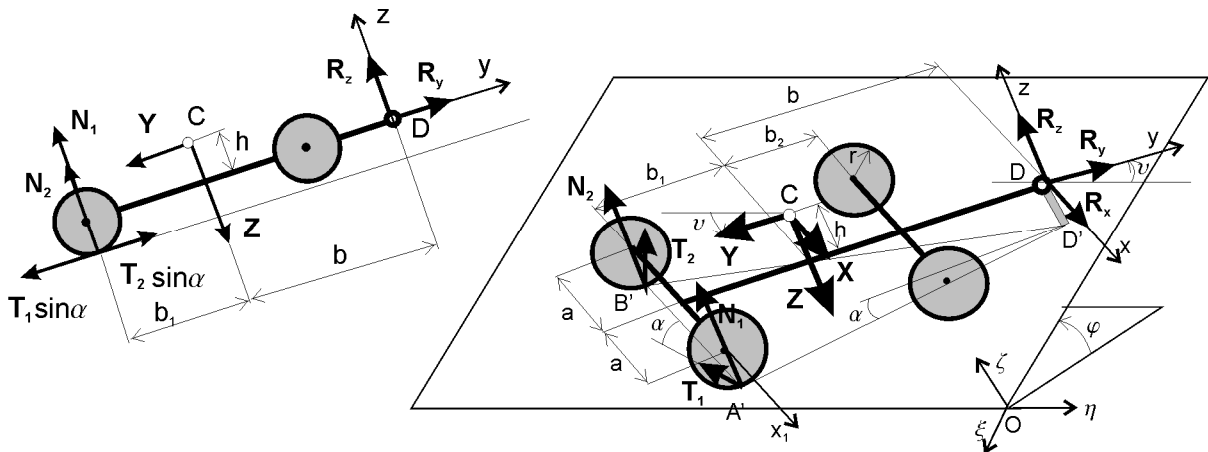
Składowe siły ciężkości samochodu G (wzdłuż x, y, z) są określone następująco:

$$X = G \sin \phi \cos u, \quad Y = G \sin \phi \sin u, \quad Z = G \cos \phi.$$

W dalszej części wyznaczmy siły tarcia występujące w punktach kontaktu kół tylnych samochodu w dwóch przypadkach: statycznym i dynamicznym.

Siły tarcia statycznego

Rozważmy graniczne położenie równowagi samochodu przy nieobracających się tylnych kołach.



Rys. 1.13. Siły działające na samochód w położeniu równowagi granicznej

W położeniu równowagi granicznej siły tarcia statycznego T₁ i T₂ są prostopadłe odpowiednio do linii A'D' i B'D'.

Dla układu z rys. 1.13 uzyskuje się następujące równania równowagi:

$$\sum_i P_{ix} : -T_1 \cos \alpha - T_2 \cos \alpha + X + R_x = 0,$$

$$\sum_i P_{iy} : -T_1 \sin a + T_2 \sin a - Y + R_y = 0,$$

$$\sum_i P_{iz} : N_1 + N_2 - Z + R_z = 0,$$

$$\sum_i M_{ix1} : -T_1 r \sin a + T_2 r \sin a - Z b_1 + Y h + R_z (b + b_1) = 0,$$

$$\sum_i M_{iy} : -N_1 a + N_2 a + X h + T_1 r \cos a + T_2 r \cos a = 0,$$

$$\sum_i M_{iz} : -(T_1 + T_2)(b + b_1) \cos a - (T_1 + T_2) a \sin a + X b = 0.$$

W stanie równowagi granicznej istnieją dodatkowo dwie zależności dotyczące sił tarcia:

$$T_1 = \mu N_1, \quad T_2 = \mu N_2,$$

gdzie μ jest współczynnikiem przyczepności kół.

Z powyższego układu równań uzyskuje się składowe reakcji w punktach styku kół:

$$N_1 = Z \frac{b(a + mr \cos a)}{2a(b + b_1 + mr \sin a)} + X \frac{h}{2a}, \quad N_2 = Z \frac{b(a - mr \cos a)}{2a(b + b_1 + mr \sin a)} - X \frac{h}{2a}.$$

Z kolei składowe prostokątne reakcji w przegubie D będą następujące:

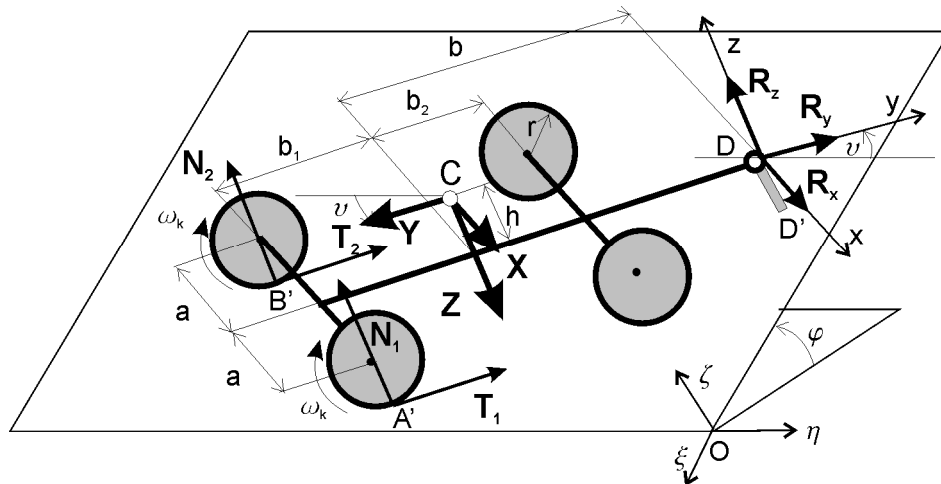
$$R_x = Z \frac{bm \cos a}{b + b_1 + mr \sin a} - X, \quad R_y = Z \frac{m^2 br \sin a \cos a}{a(b + b_1 + mr \sin a)} + X \frac{mh \cos a}{a} + Y, \quad R_z = Z \frac{b_1 + mr \cos a}{b + b_1 + mr \sin a}.$$

Rozwiązując powyższy układ równań wyznacza się kąt pochylenia φ odpowiadający stanowi równowagi granicznej:

$$\operatorname{tg} j = \frac{mb[(b + b_1) \cos a + a \sin a]}{[b + b_1 + mr \sin a] b \cos u - [(b + b_1) \cos a + a \sin a] m h \sin u}. \quad (1.14)$$

Siły tarcia kinetycznego

Rozważmy teraz samochód w momencie, kiedy jego tylne koła zaczynają się obracać prędkością kątową ω_k (rys.1.14).



Rys. 1.14. Siły działające na samochód w momencie rozpoczęcia ruchu tylnych kół

Przód samochodu jest podparty przegubowo (samochód nie ma pełnej swobody ruchu), zatem obracające się tylne koła ślizgają się po podłożu powodując wystąpienie sił tarcia kinetycznego w punktach A' i B' styku kół z płytą. W rozpatrywanej sytuacji, siły tarcia kinetycznego są równoległe do osi y pokrywającej się z podłużną osią samochodu (porównaj obecne zagadnienie z poprzednio rozpatrywanym przypadkiem sił tarcia statycznego). Należy pa-

miętać, że *siła tarcia kinetycznego* jest zawsze przeciwnie zwrócona do prędkości względnej punktu kontaktu ślizgających się ciał (w naszym przypadku - koła i płyty).

Oznaczmy:

$$m - \text{masa samochodu: } m = \frac{G}{g},$$

$$J_z - \text{masowy moment bezwładności samochodu względem osi } z: J_z = J_{zc} + m b^2,$$

$$\varepsilon - \text{przyspieszenie kątowe samochodu: } \varepsilon = \frac{d^2 u}{dt^2},$$

$$p_c - \text{składowa styczna przyspieszenia środka masy samochodu: } p_c = \varepsilon b.$$

Traktując samochód jako bryłę obracającą się wokół stałej osi z (torem środka masy C jest okrąg o promieniu b) uzyskuje się sześć następujących równań (przy przyjęciu początkowej prędkości kątowej bryły $\omega = 0$):

$$\sum_i M_{iz} : J_z \varepsilon = T_1 a - T_2 a + X b,$$

$$\sum_i P_{ix} : m p_c = X + R_x,$$

$$\sum_i P_{iy} : m \cdot 0 = T_1 + T_2 - Y + R_y,$$

$$\sum_i P_{iz} : m \cdot 0 = N_1 + N_2 - Z + R_z,$$

$$\sum_i M_{ixc} : J_{xc} \cdot 0 = (T_1 + T_2)(r + h) - (N_1 + N_2)b_1 + R_y h + R_z b,$$

$$\sum_i M_{iyc} : J_{yc} \cdot 0 = -N_1 a + N_2 a - R_x h.$$

Siły tarcia kinetycznego można wyrazić w funkcji sił normalnych:

$$T_1 = m_k N_1, \quad T_2 = m_k N_2,$$

gdzie μ_k jest współczynnikiem tarcia kinetycznego.

Rozwiązując powyższy układ równań otrzymuje się:

- składowe normalne siły kontaktu kół z podłożem

$$N_1 = \frac{Zb + Yh}{2(b + b_1 - m_k r)} + X \frac{h}{2a}, \quad N_2 = \frac{Zb + Yh}{2(b + b_1 - m_k r)} - X \frac{h}{2a},$$

- składowe prostokątne reakcji w przegubie D

$$R_x = X \frac{m_k h b - J_z}{J_z}, \quad R_y = \frac{Y[b + b_1 - m_k(r + h)] - m_k Z b}{b + b_1 - m_k r}, \quad R_z = \frac{Z(b_1 - m_k r) - Yh}{b + b_1 - m_k r},$$

- przyspieszenie środka masy

$$p_c = X \frac{b + m_k h}{J_{zc} + m b^2} b,$$

- przyspieszenia kątowe

$$\varepsilon = X \frac{b + m_k h}{J_{zc} + m b^2}. \quad (1.15)$$

Z zależności (1.15) wynika, że to składowa X siły ciężkości ($X = G \sin \varphi \cos u$) jest przyczyną powstania obrotu samochodu wokół osi prostopadłej do pochyłego podłoża.

W szczególnym przypadku, kiedy $\nu = 0^\circ$ (oś podłużna samochodu jest równoległa do dłuższej krawędzi płyty, tzn. w poprzek pochyłości podłoża - wówczas $X = G \sin \varphi$) uzyskuje się następujący wzór określający przyspieszenie kątowe samochodu:

$$e = G \frac{b + m_k h}{J_{zc} + mb^2} \sin \varphi.$$

W drugim szczególnym przypadku, gdy $\nu = 90^\circ$ (oś podłużna samochodu jest skierowana prostopadle do dłuższej krawędzi płyty, tzn. wzdłuż pochyłości podłoża) składowa $X = 0$, a tym samym $e = 0$ i obrót samochodu nie nastąpi.

1.5. Przebieg pomiarów

1.5.1. Wyznaczanie współczynnika tarcia statycznego

W pierwszej części ćwiczenia należy wykonać następujące czynności.

1. Ustawić płytę poziomo i umieścić na niej kostkę 2 (na ścianie największej - nazwanej **A**), zanotować stan powierzchni kostki w tabeli 1.1.
2. Unosić stopniowo płytę, aż do położenia, kiedy kostka rozpocznie zsuwanie się.
3. Zanotować w tabeli 1.1 wartość kąta nachylenia płyty w momencie zerwania przyczepności kostki.
4. Wykonać pomiar trzykrotnie.
5. Ułożyć tę samą kostkę na średniej ścianie - zwanej **B** - zanotować stan powierzchni kostki w tabeli 1.1 i powtórzyć kroki 2 - 4.
6. Powtórzyć kroki 1 - 5 dla kostki 1.
7. Następnie powtórzyć kroki 1 - 4 dla kostki 3.

W drugiej części ćwiczenia należy postępować następująco.

1. Ustawić płytę poziomo (kąt $\varphi = 0$).
2. Położyć na płycie kostkę 1 ścianką największą - zwaną **A** i zaczepić do niej linkę.
3. Przerzucić linkę przez krążek i zawiesić na niej pojemnik.
4. Napędzać stopniowo pojemnik obciążnikami, aż do momentu ruszenia kostki.
5. Zważyć pojemnik wraz z zawartością (ewentualnie policzyć całkowitą masę M) i zanotować wynik w tabeli 1.2.
6. Powtórzyć pomiar trzykrotnie.
7. Ułożyć tę samą kostkę na średniej ścianie - zwanej **B** - i powtórzyć kroki 2 - 6.
8. Powtórzyć kroki 1 - 7 dla kostki 2.
9. Następnie powtórzyć kroki 1 - 6 dla kostki 3.

W trzeciej części ćwiczenia należy postępować następująco.

1. Przenieść mosiężną nakrętkę na początek śruby, wymontować krążek i **umieścić jego oś ponownie w pręcie**. Nagwintowany koniec pręta winien znajdować się w górze.
2. Odkręcać nakrętkę do momentu, gdy pręt przyjmie położenie poziome, a następnie zacznie się wychylać w przeciwną stronę.
3. Przenieść nakrętkę w przeciwną stronę - **zliczając** kolejne obroty – aż do momentu, gdy nagwintowany koniec pręta zacznie się wychylać ponownie w górę. Zanotować liczbę obrotów nakrętki n w tabeli 1.3. Wykonać pomiary trzykrotnie.
4. Zrównoważyć pręt wykonując - w odpowiednią stronę - $n/2$ obrotów nakrętki.
5. Zamontować krążek i zawiesić na nim linkę z pojemnikiem w sposób umożliwiający wywołanie obrotu krążka w prawo (zobacz rys. 1.10).
6. Napędzać stopniowo pojemnik obciążnikami, aż do momentu ruszenia krążka.
7. Odczepić pojemnik, policzyć masę obciążników i zanotować całkowitą masę m w tabeli 1.4.
8. Wykonać pomiar trzykrotnie.
9. Następnie przełożyć linkę z drugiej strony krążka (wywołanie obrotu krążka w lewo).
10. Napędzać stopniowo pojemnik obciążnikami, aż do momentu ruszenia krążka.

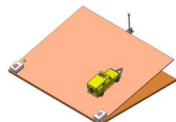
11. Odczepić pojemnik i zanotować całkowitą masę m w tabeli 1.4.
12. Wykonać pomiar trzykrotnie.

W czwartej części ćwiczenia należy postępować następująco.

1. Zawiesić linkę w połowie długości na jednym z krążków.
2. Napęniać stopniowo pojemnik obciążnikami, aż do momentu ruszenia linki.
3. Policzyc masę pojemnika z obciążnikami i zanotować masę m_2 w tabeli 1.5.
4. Wykonać pomiar trzykrotnie.
5. Następnie powtórzyć kroki 1 - 4 dla każdego z krążków nieruchomych (1 – 6).
6. Zawiesić teraz linkę na krążku ruchomym 7.
7. Napęniać stopniowo pojemnik obciążnikami, aż do momentu ruszenia krążka.
8. Zanotować masę m_2 w tabeli 1.5a; wykonać pomiar trzykrotnie.
9. Następnie przełożyć linkę przez krążki 5, 6 oraz 7 (zobacz rys.1.8b).
10. Napęniać stopniowo pojemnik obciążnikami, aż do momentu ruszenia linki.
11. Zanotować masę m_2 w tabeli 1.6; powtórzyć pomiar trzykrotnie.

1.5.2. Badanie zachowania się modelu samochodu

1. Włączyć zasilacz silnika samochodu i sprawdzić czy podstawa stanowiska jest ustawiona poziomo.
2. Ustawić samochód na płycie w taki sposób, aby jego oś podłużna była równoległa do dłuższej, poziomej krawędzi płyty.
3. Odchyłać powoli płytę do momentu, gdy nastąpi zerwanie przyczepności kół samochodu (ten kąt nachylenia płyty odpowiada równowadze granicznej samochodu).
4. Zmniejszyć znacznie wielkość kąt nachylenia płyty i umieścić samochód sposób jak poprzednio.
5. Ustawić przełącznik kierunku jazdy w pozycji **P** (koła obracają się jak przy jeździe w przód).
6. Nacisnąć lewy przycisk włączający napęd kół tylnych i obserwować zachowanie się samochodu.
7. Przetawic przełącznik kierunku jazdy na pozycję **T** (koła obracają się jak przy jeździe w tył) i powtórzyć polecenia z punktu 6.
8. Ustawić samochód w dowolnym położeniu na płycie i wykonać kroki 3 - 7.
9. Ustawić samochód prostopadłe do krawędzi płyty - wzdłuż pochyłości podłoża, jak pokazano na rysunku i powtórzyć czynności 5 - 7 dla dowolnego kąta nachylenia płyty.



10. Wyłączyć zasilacz silnika.

Po zakończeniu wszystkich pomiarów należy uporządkować stanowisko.

1.6. Opracowanie wyników pomiarów i sprawozdanie

1.6.1. Obliczenia pomocnicze

Po zakończeniu pomiarów należy przystąpić do wykonywania obliczeń niezbędnych do wypełnienia wszystkich rubryk tabeli 1.1 (**wzór 1.1**) oraz 1.2 (**wzór 1.2**).

Wartości mas kostek (rys. 1.5): kostka 1, kostka 2 i kostka 3 - $m = 351\text{ g}$.

Na podstawie zmierzonej liczby obrotów nakrętki n , należy obliczyć moment oporu tarcia na osi pręta. Wyniki zapisać do tabeli 1.3.

Dane liczbowe dotyczące stanowiska z rysunku 1.10: $r = 100\text{ mm}$, $a = 250\text{ mm}$, $M = 690\text{ g}$, skok gwintu - $s = 1,5\text{ mm}$, masa nakrętki - $m_n = 134\text{ g}$, średnica osi - $d = 8\text{ mm}$.

Wykorzystując zmierzone wartości masy m , należy obliczyć współczynniki tarcia statycznego (**wzór 1.10**) dla obrotu krążka w prawo i (**wzór 1.13**) dla obrotu krążka w lewo. Wyniki zapisać w tabeli 1.4.

Na podstawie zmierzonych wartości masy m_2 , należy obliczyć współczynniki tarcia statycznego (**wzór 1.4**) dla każdego z sześciu krążków oraz moment oporu łożyska dla krążka 7 (**wzór 1.5**). Wyniki zapisać odpowiednio w tabeli 1.5 i 1.5a.

Wymiary dotyczące stanowiska z krążkami (rys.1.8 i 1.9):

$$R = 29,5 \text{ mm}, \quad r = 10,5 \text{ mm}, \quad a = 119 \text{ mm}, \quad b = 71,5 \text{ mm}.$$

Wykorzystując wartości współczynników m dla krążków 5 i 6 oraz moment oporu M_r dla krążka ruchomego 7 należy obliczyć teoretyczną wartość masy m_2 niezbędną do uniesienia masy m_1 (**wzór 1.7**). Następnie obliczyć różnice względne wartości teoretycznej i eksperymentalnej masy m_2 . Wyniki zapisać w tabeli 1.6.

1.6.2. Sprawozdanie

Sprawozdanie musi być sporządzone w sposób *staranny* i bezwzględnie oddane na zakończenie zajęć. Należy w nim zamieścić:

1. Temat i cel ćwiczenia.
2. Wypełnione tabele 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 i 1.5, 1.5a, 1.6.
3. Obliczenia minimalnej wartości masy m_2 niezbędnej do uniesienia masy m_1 .
4. Analizę wzoru 1.14 - określającego kąt nachylenia płyty w położeniu równowagi granicznej - dla dwóch szczególnych położen samochodu: w poprzek pochyłości podłoża (kąt $u = 0$) oraz wzdłuż pochyłości podłoża (kąt $u = 90^\circ$).
Dane liczbowe dotyczące modelu samochodu: $r = 13 \text{ mm}$, $a = 30 \text{ mm}$, $b = 115 \text{ mm}$, $b_1 = 32 \text{ mm}$, $b_2 = 46 \text{ mm}$, $h = 9 \text{ mm}$.
5. Obserwacje i wnioski.

1.7. Pytania sprawdzające

1. Podać prawa tarcia Coulomba.
2. Podać wzór Eulera na tarcie cięgien.
3. Wyprowadzić zależność (1.7) na minimalną wartość masy m_2 .
4. Wyprowadzić zależność (1.10) na wartość współczynnik tarcia m .

Tabela 1.1. Wyniki pomiarów kąta pochylenia φ i obliczeń współczynnika tarcia statycznego μ

Kostka	Ścianka	Materiał: kostka / płyta	Stan powierzchni kostki	Nr <i>i</i>	Kąt pochylenia <i>φ_i</i>	Wartość średnia <i>φ</i>	Współczynnik tarcia (wzór 1.2) <i>μ</i>	Uwagi
---	---	---		--	stopień	stopień	---	---
1	A	teflon / stal		1				
				2				
				3				
	B	stal / stal		1				
				2				
				3				
2	A	stal / stal		1				
				2				
				3				
	B	stal / stal	1					
			2					
			3					
3	A	guma / stal	1					
			2					
			3					

Tabela 1.2. Wyniki pomiarów masy M i obliczeń współczynnika tarcia statycznego μ

Kostka	Ścianka	Materiały: kostka / płyta	Masa kostki <i>m</i>	Nr <i>i</i>	Masa obciążników <i>M_i</i>	Wartość średnia <i>M</i>	Współczynnik tarcia (wzór 1.1) <i>μ</i>	Uwagi
--	--	--	g	--	g	g	--	--
1	A	teflon / stal		1				
				2				
				3				
	B	stal / stal		1				
				2				
				3				
2	A	stal / stal		1				
				2				
				3				
	B	stal / stal	1					
			2					
			3					
3	A	guma / stal	1					
			2					
			3					

Tabela 1.3. Wyniki pomiarów i obliczeń momentu oporów tarcia na osi pręta M_t

Liczba obrotów nakrętki n_i	Uśredniona liczba obrotów n	Przemieszczenie osiowe nakrętki ns	Moment (średni) oporów tarcia $M_t = \frac{ns m_n g}{2}$	Stosunek momentu oporów tarcia do promienia krążka $\frac{M_t}{r}$
--	--	mm	N mm	N

Tabela 1.4. Wyniki pomiarów masy m i obliczeń współczynnika tarcia statycznego μ

Materiał		Kierunek zamierzonego obrotu krążka	Masa krążka	Nr	Masa pojemnika	Wartość średnia masy	Stosunek mas	Współczynnik tarcia (wzory: 1.10, 1.13)
krążka	klocka		<i>M</i>	<i>i</i>	<i>m_i</i>	<i>m</i>	<i>m</i> / <i>M</i>	<i>μ</i>
			g	--	g	g	--	--
tekstolit	guma	<i>W prawo</i>	690	1				
				2				
				3				
		<i>W lewo</i>		1				
				2				
				3				

Tabela 1.5. Wyniki pomiarów masy m_2 i obliczeń współczynnika tarcia statycznego

Krążek	Materiał	Kąt opasania	Masa ciężarka	Nr	Masa pojemnika	Wartość średnia masy	Stosunek mas	Współczynnik tarcia (wzór 1.4)
		α	m_1	i	m_{2i}	m_2	m_2 / m_1	μ
--	--	rad	g	--	g	g	--	--
1	drewno	p		1				
				2				
				3				
2	tekstolit	p		1				
				2				
				3				
3	teflon	p		1				
				2				
				3				
4	mosiądz	p		1				
				2				
				3				
		$3p$		1				
				2				
				3				
5	mosiądz	p		1				
				2				
				3				
6	mosiądz	p		1				
				2				
				3				

Tabela 1.5a. Wyniki pomiarów masy m_2 i obliczeń momentu oporu łożyska M_r

7	Krążek ruchomy	p		1				Moment oporu M_r [N mm] (wzór 1.5)
				2				
				3				

Tabela 1.6. Linka opasująca dwa krążki nieruchome 5, 6 oraz ruchomy 7 – wartości masy m_2

Materiał	Masa ciężarka	Nr	Masa pojemnika	Wartość średnia masy	Kąty opasania (wzory 1.6)				Masa teoretyczna (wzór 1.7)	Różnica względna mas
	m_1	i	m_{2i}	m_2	b	g	α_5	α_6	m_{2t}	$100(m_2 - m_{2t})/m_{2t}$
--	g	--	g	g	0°	0°	rad	rad	g	%
mosiądz		1								
		2								
		3								