

Jarosław BRODNY  
Politechnika Śląska, Gliwice

## **ANALIZA WPLYWU TARCIA NA PRACĘ ODRZWI OBUDOWY PODATNEJ**

**Streszczenie.** W artykule zostały przedstawione wyniki analizy mającej na celu określenie wpływu tarcia na pracę złącza ciernego odrzwi obudowy typu ŁP. Rozpatrzono wpływ współczynnika tarcia w gwincie i na powierzchni oporowej nakrętki w połączeniu śrubowym strzemią na siłę osiową w śrubie. Określony został także wpływ współczynnika tarcia pomiędzy współpracującymi kształtownikami złącza ciernego na charakterystykę jego pracy. Uzyskane wyniki prowadzą do wniosku, że tarcie ma istotny wpływ na pracę złącza ciernego odrzwi obudowy, a poprawne określenie wartości współczynników tarcia jest istotne dla optymalizacji pracy złącza ciernego i całych odrzwi obudowy.

## **AN ANALYSIS OF FRICTION'S EFFECT ON THE WORKING OF THE YIELDING SUPPORT FRAME**

**Summary.** The article presents the results of an analysis the purpose of which is to identify the effect of friction on the operation of a frictional joint in the ŁP type support frame. The effect of the friction coefficient in the thread and at the nut's bearing surface in a screw joint of a clamp on the axial force of the screw has been considered. The calculations assume that the coefficients are equal. The effect of the friction coefficient between the interworking shaped sections of a frictional joint on its working characteristics has also been determined. The results obtained lead to a conclusion that friction has an important effect on the working of a frictional joint in the support frame. Besides, it is important to determine appropriately the friction coefficient value for optimising the working of a frictional joint and the entire support frame.

### **1. Wstęp**

W polskich kopalniach węglowych do zabezpieczania wyrobisk korytarzowych powszechnie stosuje się stalową odrzwiową podatną obudowę typu ŁP. Zasada pracy tej obudowy oparta jest na wykorzystaniu sił tarcia pomiędzy współpracującymi kształtownikami, co zapewnia jej odpowiednią podatność i nośność. Obudowa typu ŁP samoczynnie zmniejsza swoje gabaryty, kiedy obciążenie czynne zewnętrzne przekracza jej nośność zsuwną. Powoduje to poprawę stanu naprężenia w obudowie, dzięki czemu zachowuje ona swoją funkcję.

Możliwość wzajemnego przemieszczania się kształowników odrzwi pod wpływem obciążenia zewnętrznego zapewniają złącza cierne. Złącze cierne składa się z dwóch zachodzących na siebie kształowników dociśniętych za pomocą strzemion. Siła tarcia pomiędzy kontaktującymi się kształownikami jest wynikiem działania siły docisku oraz współczynnika tarcia pomiędzy kształownikami. Siła docisku zależy od wartości momentu skręcającego, jakim dokręcone są nakrętki śrub strzemion.

Konstrukcja strzemion oparta jest na wykorzystaniu mechanizmu śrubowego do przenoszenia sił dociskających kształowniki. W fazie montażu siły te są wynikiem działania momentu dokręcającego, działającego na nakrętkę. W czasie pracy śruby są dodatkowo obciążone siłami będącymi wynikiem wymuszeń zewnętrznych, działających na złącze cierne i powodujących rozciąganie lub ściskanie jarzm strzemion.

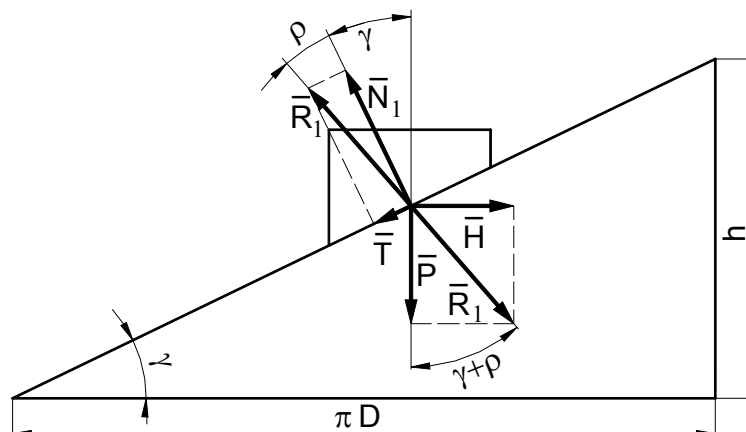
Moment dokręcający nakrętkę oprócz wywołania napięcia wstępного w śrubie musi pokonać także siły tarcia w gwincie oraz siły tarcia na powierzchniach oporowych pomiędzy nakrętką a kołnierzem strzemia. Można więc przyjąć, że praca złącza ciernego opiera się w głównej mierze na wykorzystaniu zjawiska tarcia pomiędzy współpracującymi kształownikami oraz w mechanizmie śrubowym.

W artykule zostały przedstawione analizy mające na celu określenie, jaki wpływ na charakterystykę pracy złącza ciernego mają współczynniki tarcia w połączeniu śrubowym i pomiędzy współpracującymi kształownikami.

## **2. Wpływ tarcia na pracę połączenia śrubowego**

Zasada działania mechanizmu śrubowego polega na zamianie momentu dokręcenia nakrętki na siłę osiową działającą wzdłuż śruby.

Przy założonym momencie dokręcenia o wartości siły wzdłużnej, dociskającej współpracujące jarzma, decydują kąt wzniosu linii śrubowej  $\gamma$  oraz kąt rozwarcia gwintu metrycznego  $\alpha$  [2]. Na rysunku 1. został przedstawiony schemat śruby jako maszyny prostej.



Rys. 1. Schemat śruby jako maszyny prostej

Fig. 1. Screw diagram as a simple machine

Moment dokręcenia złącza śrubowego oprócz wywołania napięcia wstępnego w śrubie musi pokonać siły tarcia w gwincie oraz siły tarcia na powierzchniach oporowych pomiędzy nakrętką a kołnierzem strzemię. Moment ten jest sumą dwóch momentów:

$$M_d = M_s + M_n, \quad (1)$$

gdzie:

$M_s$  – moment tarcia w gwincie,

$M_n$  – moment tarcia pomiędzy nakrętką a kołnierzem jarzma dolnego.

Momenty te obliczamy z zależności:

$$M_s = \frac{1}{2} \cdot P \cdot d_s \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \rho'); \quad M_n = \frac{1}{2} \cdot P \cdot D_s \cdot \mu_n, \quad (2)$$

gdzie:

$P$  – siła osiowa w śrubie,

$d_s$  – średnica podziałowa gwintu śruby,

$D_s$  – średnia robocza styku nakrętki i kołnierza,

$\mu_n$  – współczynnik tarcia pomiędzy nakrętką a powierzchnią kołnierza,

$\gamma$  – kąt wzniosu linii śrubowej,

$\rho'$  – pozorny kąt tarcia.

Pozorny kąt tarcia dla gwintu metrycznego obliczamy z zależności:

$$\rho' = \operatorname{arctg} \frac{\mu}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \operatorname{arctg} \mu' \quad (3)$$

gdzie:

$\alpha$  – kąt rozwarcia gwintu metrycznego,

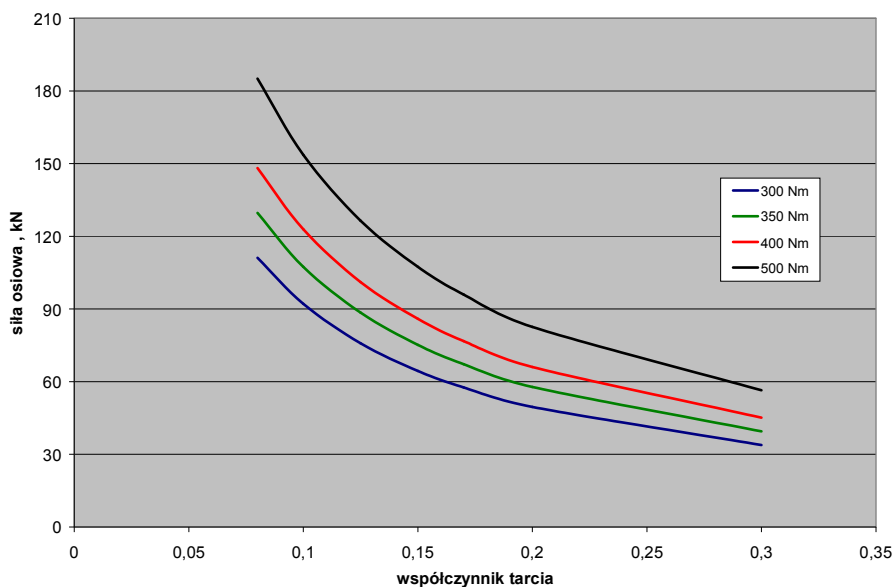
$\mu$  – współczynnik tarcia gwintu,

$\mu'$  – pozorny współczynnik tarcia gwintu.

Średnica robocza powierzchni oporowej nakrętki i kołnierza przyjmowana jest jako średnia arytmetyczna zewnętrznej ( $D_z$ ) i wewnętrznej ( $D_w$ ) średnicy powierzchni styku nakrętki lub jako średnia arytmetyczna średnicy nominalnej śruby ( $d$ ) i tzw. średnicy pod klucz ( $D_k$ ). Po podstawieniu danych do równania (1) wyznaczamy zależność na siłę osiową  $P$  w śrubie:

$$P = \frac{2M_d}{d_s \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \rho') + 0,5(d + D_k) \cdot \mu_n} \quad (4)$$

Na rysunku 2. przedstawione zostały zależności pomiędzy współczynnikiem tarcia w gwincie a wartością siły osiowej w śrubie dla różnych momentów dokręcenia śruby w złączu ciernym. Obliczenia wykonano przyjmując takie same wartości współczynników tarcia dla gwintu i między nakrętką a powierzchnią kołnierza.



Rys. 2. Zależność siły osiowej w śrubie od współczynnika tarcia dla różnych wartości momentu dokręcenia nakrętki

Fig. 2. Relation between axial force in the screw and the friction coefficient for different nut torques

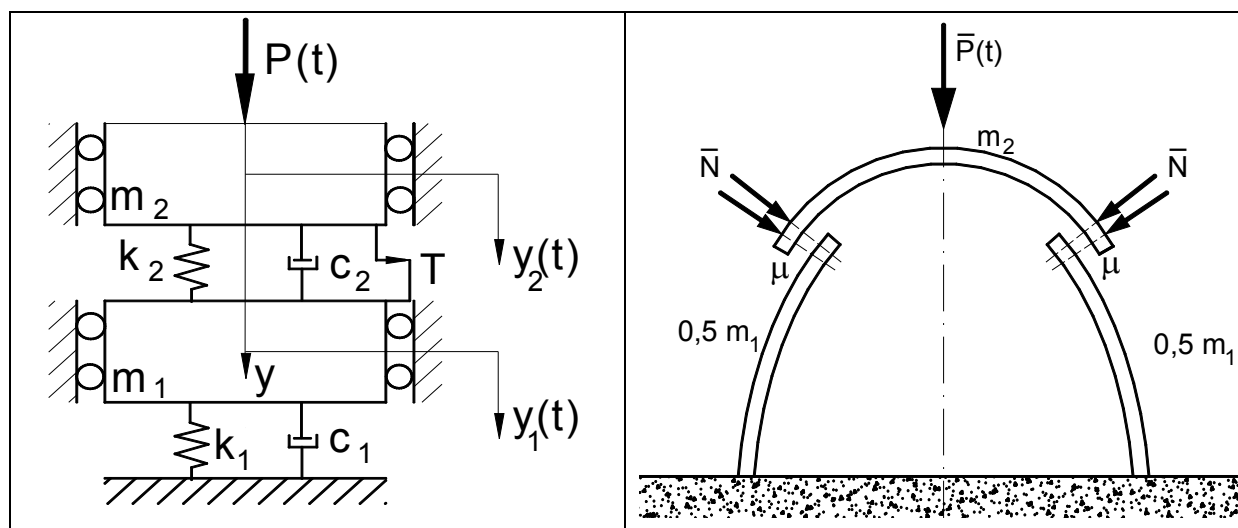
W tabelicy 1 przedstawione zostały wyniki pomiaru sił w śrubach strzemion dla trzech różnych wartości sił tarcia w gwincie i pomiędzy powierzchnią oporową nakrętki a kołnierzem strzemięcia, uzyskane w czasie badań stanowiskowych złączy ciernych. Analizując otrzymane wyniki, należy stwierdzić, że wraz ze wzrostem współczynnika tarcia w połączeniu gwintowym maleje siła osiowa w śrubach strzemion.

Tablica 1

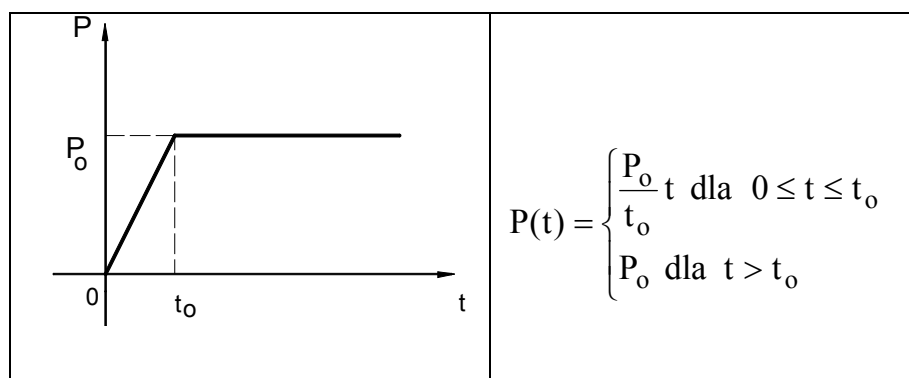
Przypadek tarcia	Tarcie suche	Tarcie półpłynne	Tarcie płynne
Wartość siły wstępnej w śrubie strzemienia, kN	74 – 76	78 – 80	83 – 85

### 3. Wpływ tarcia na charakterystykę pracy odrzwi obudowy podatnej

W celu wyznaczenia wpływu tarcia na charakterystykę pracy odrzwi obudowy opracowano jej model fizyczny (rys. 3) oraz model matematyczny (5). Przedstawiony na rysunku 3. schemat odrzwi oraz ich model fizyczny uwzględniają tarcie pomiędzy współpracującymi kształtownikami (siła T) [3]. Odrzvia obciążone są siłą zewnętrzną czynną P(t), której charakterystykę przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Model fizyczny odrzwi obudowy  
 Fig. 3. Physical model of the support frame's



Rys. 4. Charakterystyka obciążenia odrzwi obudowy  
 Fig. 4. Characteristics of the support frame's load

Równanie ruchu obudowy opisuje następujący układ równań różniczkowych:

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{y}_2 + c_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_2 (y_2 - y_1) + T &= P_y(t) \\ m_1 \ddot{y}_1 + (c_1 + c_2) \dot{y}_1 - c_2 \dot{y}_2 + (k_1 + k_2) y_1 - k_2 y_2 + T &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie:

$m_2, m_1$  – masy łuku stropnicowego i łuków ociosowych odrzwi,

$k_1, k_2$  – współczynniki sprężystości,

$c_1, c_2$  – współczynniki tłumienia,

$T$  – siła tarcia pomiędzy kształtownikami,

$P_y(t)$  – obciążenie zewnętrzne.

Siła tarcia zmienia się zgodnie z równaniem:

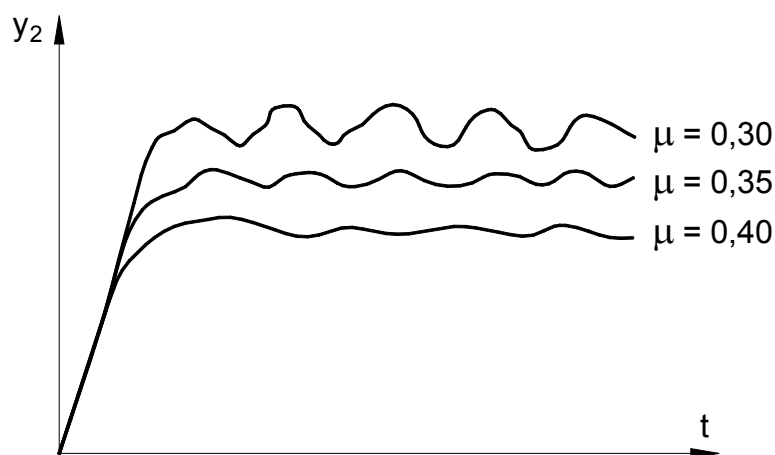
$$T = N \cdot \mu \begin{cases} \mu = \mu_{st} & \text{dla } \dot{y}_2 = 0 \\ \mu = \mu_k & \text{dla } \dot{y}_2 \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

gdzie:

$N$  – siła docisku kształtowników,

$\mu_{st}, \mu_k$  – odpowiednio współczynniki tarcia statycznego i tarcia kinematycznego.

Siła tarcia pomiędzy kształtownikami zależna jest od wartości współczynnika tarcia  $\mu$ . Na rysunku 5. zostały przedstawione charakterystyki przemieszczenia odrzwi w czasie dla różnych wartości tego współczynnika. Na rysunku tym podane zostały wartości współczynnika tarcia statycznego. Wartości współczynnika tarcia kinematycznego zmieniały się proporcjonalnie i wynosiły od 0,2 do 0,3.

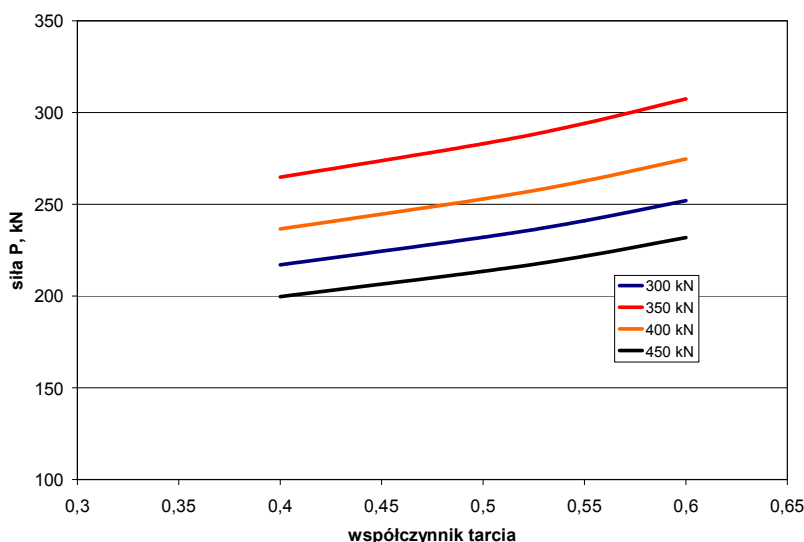


Rys. 5. Przemieszczenie odrzwi w zależności od współczynnika tarcia

Fig. 5. Frame displacement according to friction coefficient

Wartość współczynnika tarcia pomiędzy współpracującymi kształtownikami ma istotny wpływ na wartość siły, przy której dochodzi do pierwszego zsuwu odrzwi. Na rysunku 6.

zostały przedstawione wyniki analizy numerycznej wpływu tego współczynnika na nośność zsuwną złącza ciernego [1]. Przedstawione zależności wyznaczono dla różnych wartości wstępnych momentów dokręcenia śruby strzemion.



Rys. 6. Zależność wartości siły przy pierwszym zsuwie złącza od wartości współczynnika tarcia pomiędzy kształtownikami

Fig. 6. Relation between the force value for the first joint sliding and the friction coefficient value for shaped sections

#### 4. Podsumowanie

Przedstawione analizy jednoznacznie dowodzą, że tarcie ma bardzo istotny wpływ na pracę odrzwi obudowy podatnej typu ŁP oraz stojaków ciernych, w których wykorzystywane są złącza cierne.

W przypadku połączenia śrubowego w strzemionach, którego celem jest zapewnienie odpowiedniej siły docisku współpracujących kształtowników, nawet niewielka zmiana współczynnika tarcia w gwincie i pomiędzy powierzchnią oporową nakrętki a kołnierzem strzemienia powoduje istotną zmianę wartości siły osiowej w śrubie (rys. 2). Ma to bardzo duże znaczenie dla poprawnej pracy strzemienia i całego złącza ciernego odrzwi. Wartość wstępnej siły osiowej w śrubie strzemienia decyduje bowiem o wartości nośności zsuwnej złącza [4]. Przekłada się to bezpośrednio na wartość siły obciążającej odrzwi, przy której dochodzi do pierwszego zsuwu. Decyduje to także o sprawności złącza śrubowego. Przy wyższych wartościach współczynnika tarcia znaczna część momentu dokręcenia nakrętki śruby strzemienia jest wykorzystywana na pokonanie sił tarcia, zamiast na wytworzenie odpowiednio dużej siły osiowej w śrubie.

Z mechanicznego punktu widzenia korzystniejsze warunki pracy występują przy mniejszych wartościach współczynnika tarcia w gwincie i pomiędzy nakrętką a kołnierzem strzemięcia.

Analizując wpływ tarcia pomiędzy współpracującymi kształtownikami na charakterystykę pracy złącza ciernego, należy zauważyć, że im większa wartość tego współczynnika, tym obciążenia przenoszone przez złącze też są większe. Przyjęty do analizy model funkcjonalny odrzwi obudowy daje duże możliwości badania wrażliwości pracy odrzwi na zmianę wartości współczynnika tarcia pomiędzy łukiem stropnicowym a ociosowymi. Z analizy zależności z rysunku 5. wynika, że wzrost wartości współczynnika tarcia powoduje mniejsze przemieszczenia łuku stropnicowego (masa  $m_2$ ) oraz większe tłumienie jego drgań.

Analizując zależność wartości siły przy pierwszym zsuwie złącza ciernego od współczynnika tarcia pomiędzy współpracującymi kształtownikami, należy stwierdzić, że siła ta rośnie wraz ze wzrostem tego współczynnika. Ma to istotny wpływ na charakterystykę pracy odrzwi oraz na wykorzystanie możliwości nośnych kształtowników.

Wstępna ocena uzyskanych wyników wskazywałaby, że wyższe wartości współczynników tarcia wpływają na korzystniejszą i stabilniejszą charakterystykę pracy odrzwi. W rzeczywistości jest tak tylko do momentu, w którym siła tarcia przyjmie tak dużą wartość, że uniemożliwia wystąpienie zsuwów. Odrzwia będą wtedy pracowały jako układ sztywny, co jest niekorzystne dla obudowy typu ŁP. Zbyt mała siła tarcia pomiędzy współpracującymi kształtownikami jest przyczyną zbyt szybkich zsuwów.

Przedstawiony model funkcjonalny odrzwi oraz wyniki analiz powinny zostać wykorzystane do optymalizacji pracy złączy ciernych odrzwi obudowy typu ŁP.

## BIBLIOGRAFIA

1. Brodny J.: Tarcie a bezpieczeństwo pracy odrzwi obudowy górniczej. Prace Naukowe GIG, Katowice 2010.
2. Korewa Z. : Podstawy konstrukcji maszyn. WNT, Warszawa 1965.
3. Osiński Z. : Tłumienie drgań. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
4. Prusek S., Rotkegel M.: Przebieg kompleksowego procesu projektowania nowej konstrukcji obudowy wyrobisk korytarzowych. Materiały Konferencyjne Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków 2008, s. 333-352.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Stanisław Prusek



**Abstract**

The friction phenomenon has a significant effect on the working of mechanical systems. The article presents the results of an analysis the purpose of which is to identify the effect of friction on the operation of a frictional joint in the LP type support frame.

The friction force between the interworking shaped sections and in the screw joint is especially important for the friction joint's correct work. The effect of the friction coefficient between the interworking shaped sections of a frictional joint on its working characteristics has also been determined. The analysis has been made for a system with two degrees of freedom. Working characteristics have been identified for this system according to the friction coefficient. The values of forces at which the first sliding in the joint was occurring have also been identified.

The effect of the friction coefficient in the thread and at the nut's bearing surface in a screw joint of a clamp on the axial force of the screw has also been considered. The calculations assume that the coefficients are equal. Axial force is growing markedly by lowering the friction coefficient for a screw joint which is very beneficial for the correct work of the joint.

The results obtained lead to a conclusion that friction has an important effect on the working of a frictional joint in the support frame. Besides, it is important to determine appropriately the friction coefficient value for optimising the working of a frictional joint and the entire support frame.