

Krzysztof WIERZCHOLSKI*, **Andrzej MISZCZAK****

TRIBOLOGIA RZEPU SYNTETYCZNEGO

TRIBOLOGY OF SYNTHETIC TURNIP BURR

Słowa kluczowe:

tribologia rzepu, tarcie adhezyjne, rzepy syntetyczne, siły adhezji, siły kohezji

Key words:

turnip tribology, adhesion friction, synthetic turnips, adhesion forces, cohesion forces

Streszczenie

Niniejsza praca przedstawia tribologiczny opis mikrowęzłów tarciovych, o dużej wartości siły tarcia adhezyjnego pomiędzy stykającymi się powierzchniami dwóch elementów.

Rzepy syntetyczne są przykładem technicznym węzłów tarcia w mikroskali, których charakterystyka jest zbliżona do charakterystyki

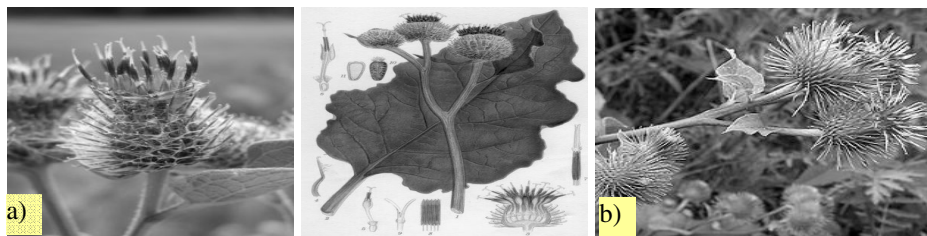
* Technical University of Koszalin, Institute of Mechatronics, Nanotechnology and Vacuum Technique, PL 75-620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17, Poland; krzysztof.wierzcholski@wp.pl.

** Gdynia Maritime University, Morska Street 81-87, 81-225 Gdynia, Poland; miszczak@am.gdynia.pl.

rzepu naturalnego w postaci dużej ilości mikrohaczyków występujących w owocostanie łopianu. Rzep syntetyczny składa się z dwóch elementów, z tym że powierzchnia jednego jest pokryta dużą ilością mikrohaczyków, natomiast powierzchnia drugiego ma warstwę z licznymi mikropętelkami. Przy docisku obu takich elementów następuje ich zespolenie. Ponieważ mikrohaczyki i mikropętelki są mikroskopijnych wymiarów, stąd siły zaczepu pomiędzy nimi są porównywalne z siłami tarcia i adhezji. Opisany w pracy mechanizm węzłów tarcia ma zastosowanie przy produkcji rzepów syntetycznych odpornych na zużycie.

WPROWADZENIE

Rzepy syntetyczne, jako system tribologiczny służą do zapinania części odzieży, a także do zamykania toreb i różnych pasków. Łopiany są pierwowzorem rzepów syntetycznych. Na **Rys. 1** pokazane są fotografie dwóch gatunków łopianu rosnącego w Europie i Azji [**L. 1–4**]:



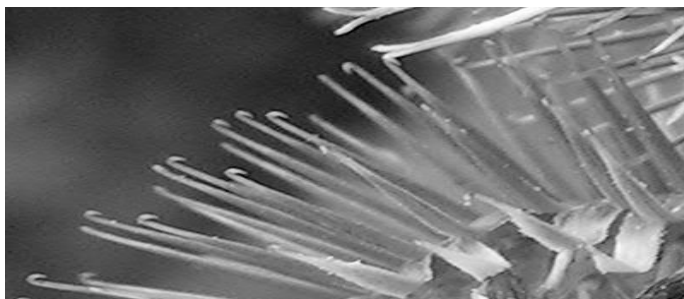
Rys. 1. Fotografie kwiatu łopianu: a) łopian pajęczynowy, b) łopian większy [**L. 4**]
Fig. 1. View of the burdock: a) spider burdock, b) bigger burdock [**L. 4**]

MECHANIZMY TRIBOLOGICZNE RZEPU NATURALNEGO

Kwiaty łopianu mają barwę fioletowo-różową. Owoce łopianu rozsiewane są głównie przez zwierzęta [**L. 3**]. Haczyki na owocostanie przedstawia **Rys. 2**.

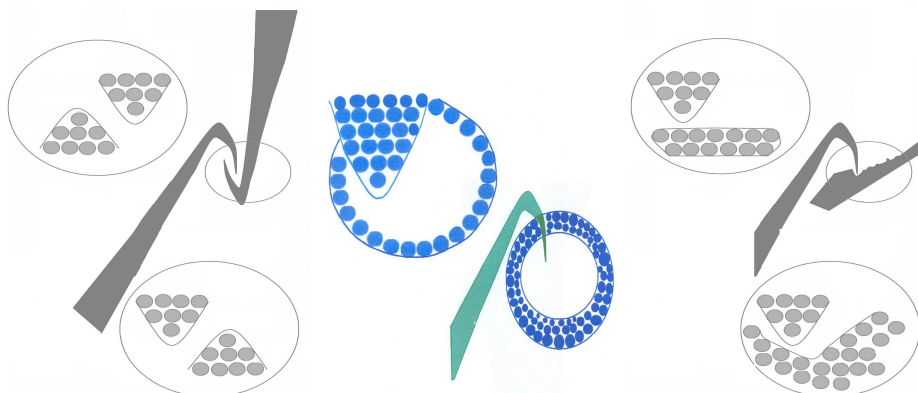
W wyniku kontaktu z drugim podobnym ciałem haczyki o długości od kilku mikrometrów do kilkudziesięciu mikrometrów przylegające do jednej powierzchni elementu szczipają się z haczykami lub pętelkami leżącej na drugiej powierzchni na zasadzie zaczepów oraz tarcia i sił adhezji, patrz **Rys. 3**. Istotne znaczenie tarcia i sił adhezji w takim połączeniu tarciovym występuje w przypadku, gdy wymiary powierzchni styku

mikropętelki lub mikrohaczyka są rzędu jednego mikrometra lub mniejsze, a w związku z tym siły zaczepu są znikome. W ten sposób powierzchnie zwierają się.



Rys. 2. Widoczne haczyki na owocostanie łopianu w powiększeniu komputerowym [L. 4]

Fig. 2. Visible hooks on the fructification of the burdock in computer enlargement [L. 4]

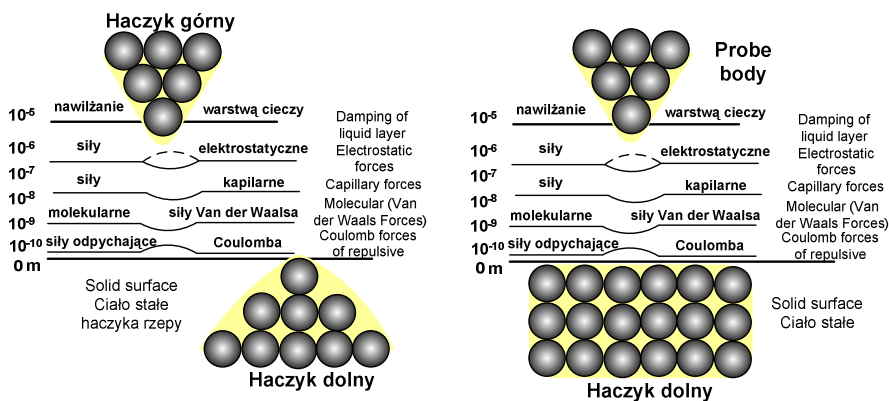


Rys. 3. Szczępienie się haczyka z haczykiem oraz haczyka z chropowatą powierzchnią elementu

Fig. 3. Tacking between two hooks and between the hook and roughness surface

Podczas rozdzielania elementów haczyki ulegają sprężystemu odkształceniu, co powoduje możliwość oddzielenia ich od siebie. Powstają wtedy odpowiednie duże naprężenia na powierzchni haczyków umożliwiające odkształcenia sprężyste i wyprostowania. Jednak w wyniku bardzo dużych naprężeń haczyki mogą ulec trwałemu odkształceniu. **Rys. 3** przedstawia widok szczępienia się haczyka z pętelkami powierzchni drugiego elementu oraz szczępienia się dwóch haczyków ze sobą w mikro-

skali. Układ atomów (komórek) w ostrzu haczyka oraz na chropowatej powierzchni styku, jak również układ atomów (komórek) w ostrzach obu szczipających się haczyków pokazane są na rysunku pomocniczym w nanoskali. Na **Rysunkach 4a i 4b** pokazane są w powiększeniu obszary styku w nanoskali z uwidocznieniem stref występowania sił adhezyjnych, w tym elektrostatycznych, kapilarnych, Van der Waalsa [L. 7].



Rys. 4. a) Szczipania się dwóch haczyków, b) haczyk szczipa się z chropowatą powierzchnią

Fig. 4. a) The tacking of two hooks, b) The tacking of the hook with the surface roughness

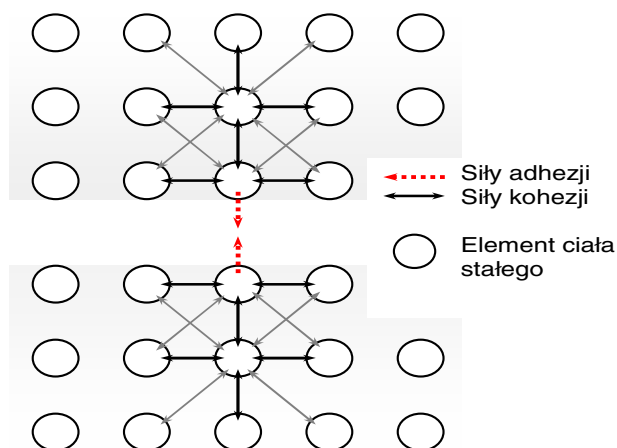
Siły adhezji i kohezji nie są jednak jednolite, bowiem rozróżniamy tutaj siły elektrostatyczne, siły kapilarne, molekularne siły Van der Waalsa oraz siły odpychające Coulomba. **Rysunek 4** ilustruje podział grubości super cienkiej warstwy medium zalegającego pomiędzy powierzchniami wraz z charakterystycznymi siłami występującymi w tych strefach. Pole sił wytwarzane przez elektrostatyczne ładunki atomów, cząsteczek warstwy wierzchniej występują w strefach medium o grubości 1 mikrometra pomiędzy współpracującymi powierzchniami na przykład haczyków w rzepe. Wartości sił maleją wykładniczo wraz ze wzrostem odległości od powierzchni, natomiast rosną prawie proporcjonalnie ze wzrostem krzywizny [L. 6]. Siły kapilarne pokazane na **Rys. 4a** i **Rys. 4b** wywołane są napięciem powierzchniowym medium zalegającego pomiędzy powierzchniami oraz występują na grubości 1/10 mikrometra. Przy grubości 1/10 nanometra mamy do czynienia z siłami odpychającymi Coulomba w strefie pokazanej na **Rys. 4a** i **Rys. 4b**. Siły molekularne Van der Waalsa występują do grubości filmu około 1 nm, a nieprzekra-

czającego 10 nanometrów. Powyżej 10 nanometrów siły te zanikają. Siły Van der Waalsa pochodzą od międzycząsteczkowych elektromagnetycznych oddziaływań pomiędzy ładunkami elektronów i jąder atomów. Siły te w obszarze odległości przekraczającej znacznie wymiar atomu są siłami przyciągającymi oraz szybko maleją z odległością. Na małych odległościach rzędu wymiaru atomu są siłami odpychającymi i gwałtownie rosną wraz ze zmniejszaniem się odległości.

Rys. 5 przedstawia siły adhezji i siły kohezji w skali molekularno-cząsteczkowej, występujące pomiędzy dwoma powierzchniami haczyków lub w strefie zbliżenia haczyka z chropowatą powierzchnią drugiego elementu. Warstewka powietrza lub medium o grubości od 1 do 50 nanometrów pomiędzy szepiającymi się powierzchniami haczyków jest pod działaniem sił tarcia od adhezji F_{ad} , które zachodzą wskutek działania sił pomiędzy cząsteczkami medium i warstwy wierzchniej, czyli dwóch różnych substancji po dostatecznym ich zbliżeniu [L. 7].

Wraz z adhezją występują siły tarcia od kohezji F_{kh} , czyli inaczej siły tarcia pochodzące od sił spójności polegające na wzajemnym przyciąganiu się cząsteczek tej samej substancji na skutek sił międzycząsteczkowych. Całkowite siły tarcia są sumą obu opisanych sił pokazanych na **Rys. 5**.

Szepianiem nazywamy zjawisko trwałego, bezdyfuzyjnego połączenia stykających obszarów trących się powierzchni elementów na skutek wiązania chemicznego na pierwotnej granicy ich rozdziału.



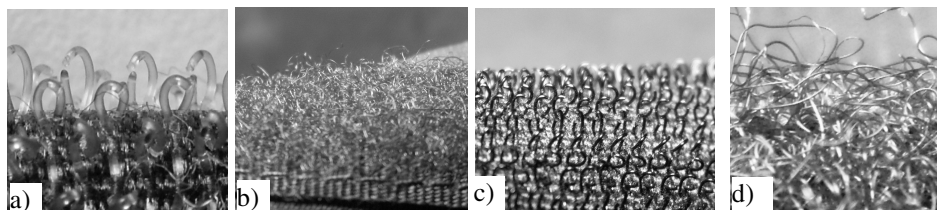
Rys. 5. Różnice pomiędzy siłami adhezji i kohezji w obu zbliżonych ze sobą ciałach

Fig. 5. Differences between adhesion and cohesion forces on the two oncoming bodies

Sczepianie zachodzi w temperaturze niższej od temperatury wyraźnej dyfuzji pomiędzy ciałami i nie zależy od czasu. Na sczepienie ma wpływ doprowadzenie odpowiedniego rodzaju i wartości energii do pierwotnej powierzchni styku. Podstawowym rodzajem energii, która doprowadza do sczepienia jest energia odkształcenia postaciowego.

MECHANIZMY TRIBOLOGICZNE RZEPU SYNTETYCZNEGO

Materiał w formie rzepu został wymyślony przez szwajcarskiego inżyniera Georges'a de Mestrala w 1941 r. Inspiracją były owocostany łopianu, które roznoszą owoce, przyczepiając się do ubrań lub do sierści zwierząt. Wniosek patentowy oraz rejestracja nazwy Velcro została dokonana przez De Mestrala w 1951 r. Nazwa jest połączeniem francuskich słów *velours* i *crochet* oznaczających welwet i haczyk. Velcro jest zarejestrowanym znakiem towarowym dla tkaniny pokazanej na **Rys. 5**, określanej popularnie jako rzep [**L. 5**].



Rys. 5. Tkanina Velcro jedna z haczykami a), c) druga z pętelkami b), d)

Fig. 5. Velcro texture with hooks a), c) and with loops b), d)

W przypadku rzepu syntetycznego w rejonie współpracy pożądana jest jak największa siła tarcia. Wiadomo, że lepkość mikro- lub nanowarstewki suchego, a nawet zawilgoconego powietrza pomiędzy mikrohaczykami a mikropętelkami jest bardzo mała, a zatem siła tarcia pomiędzy pojedynczą parą sczepiających się haczyków jest bardzo mała. Z Nanotribologii [**L. 1, 2**] wiadomo, że lepkość dynamiczna na skutek sił adhezji rośnie wykładniczo po grubości mikrowarstewki powietrza oddzielającej w nanometrach strefę kontaktu wraz ze zbliżaniem się do powierzchni. Wartości lepkości dynamicznej medium maleją wykładniczo wraz ze wzrostem odległości od powierzchni, natomiast rosną prawie proporcjonalnie ze wzrostem mikrokrzywizny powierzchni haczyka. Całkowita lepkość dynamiczna η_T warstewki powietrza jest sumą niezmiernie ma-

łej, wręcz pomijalnej lepkości klasycznej η (niezmieniającej się po grubości nanowarstwy) powiększonej lepkością η_{ah} wytworzoną przez siły adhezji oraz lepkością η_{kh} wywołaną na skutek sił kohezji zmieniającej się po grubości nanowarstewki. Zapiszemy to następującym wzorem:

$$\eta_T(\varphi, r, z) = \eta(\varphi, z) + \eta_{akh}(\varphi, r, z), \quad \eta_{akh}(\varphi, r, z) = \eta_{ah}(\varphi, r, z) + \eta_{kh}(\varphi, r, z) \quad (2)$$

Lepkość dynamiczna w przypadku docisku lub ruchu pętelki i haczyka generuje ciśnienie hydrodynamiczne, które przy praktycznym pominięciu klasycznej lepkości powietrza jest ciśnieniem wywołanym na skutek sił adhezji. Tak więc ciśnienie całkowite p_T składa się z ciśnienia klasycznego pomijalnie małego oraz uśrednionego po grubości warstwy ciśnienia adhezyjno-kohezyjnego p_{akh} , co zapisujemy wzorem:

$$p_T = p(\varphi, z, t) + p_{akh}(\varphi, z, t) \approx p_{akh}(\varphi, z, t) \quad (3)$$

Dla wysokości warstewki powietrza h , prędkości docisku lub przesuwu v , powierzchni kontaktu S , współczynnika tarcia μ , całkowitą siłę tarcia wyrażamy teraz wzorem:

$$F_T = \frac{\eta_{akh} \cdot v \cdot S}{h} + \mu p_T \cdot S \quad (4)$$

Wartości wyznaczone wzorami są bardzo małe. Jednakże w rzepach syntetycznych mamy tysiące par współpracujących haczyków. Ten fakt powoduje, że uzyskujemy dostatecznie znaczącą wartość siły tarcia.

WNIOSKI

Uszkodzenia rzepu syntetycznego są spowodowane niewłaściwym uwzględnieniem sił adhezji w projektowaniu ilości haczyków w tkaninie rzepu przy projektowaniu połączeń tarciovych. Adhezja zwiększa wartości ciśnienia, ale jednocześnie zwiększa wartość sił tarcia korzystną dla rzepu syntetycznego.

Podziękowanie

Autorzy pragną wyrazić podziękowanie Prof. S. Pytko za cenne uwagi w trakcie pisania pracy.

LITERATURA

1. Barthlott W., Neinhuis C.: Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202, 1, 1997, pp. 1–8.
2. Barthlott W., Neinhuis C.: Lotusblumen und Autolacke Ultrastruktur pflanzlicher Grenzflächen und biomimetische unverschmutzbare Werkstoffe, *Bionik Kongress*, München, 1998 ed. by W. Nachtigall, A. Wisser (Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1998), pp. 281–293.
3. Eigenbrode S.D.: Plant surface waxes and insect behavior, in *Plant Cuticles-An Integral Functional Approach*, ed. By G. Kerstiens (BIOS, Oxford, 1996), pp. 201–222.
4. <http://pl.wikipedia.org/wiki/%C%8lopian>, 2010.
5. <http://pl.wikipedia.org/wiki/velcro>, 2010.
6. Scherge M., Gorb S.N.: *Biological Micro- and Nano-tribology*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London 2000.
7. Wierzcholski K.: Adhesion and cohesion forces occurring in parabolical microbearing, *Tribologia*, 5, (227), 2009, pp. 221–228.

Recenzent:
Stanisław PYTKO

Summary

Present paper shows the tribological description of friction micro-nods where the largest adhesion friction forces between two cooperating surfaces ought to be produced. The presented development has applications during the production of fasteners with minimum wear.

In 1948, the Swiss engineer George de Mestral was cleaning his dog of burrs picked up on a walk when he realised how the hooks of the burrs clung to the fur. George de Mestral named his invention “Velcro”, which is a portmanteau of the two French words *velours* and *crochet*, or “hook”.

Velcro is a brand name of fabric hook-and-loop fasteners. It consists of two layers: a “hook” side, which is a piece of fabric covered with tiny hooks, and a “loop” side, which is covered with even smaller and “hairier” loops. When the two sides are pressed together, the hooks catch in the loops and hold the pieces together. When the layers are separated, the strips make a characteristic “ripping” sound. Velcro hook-and-loop fasteners can be made of many things. The first samples were made of cotton, which proved to be impractical. Nylon and polyester are the fibers most commonly used now. Velcro fasteners made of Teflon loops, polyester hooks, and glass backing are used on space shuttles.

The term *Velcro* is a registered trademark in most countries. Generic terminology for these fasteners include “hook and loop”, “burr” and “touch” fasteners.