

Wpływ kształtu elektrod padów elektroadhezyjnych na moment trzymający siły elektrostatycznej

Streszczenie. W artykule przedstawiono fizyczny opis zjawiska elektroadhezji. Przybliżono jego zastosowanie w przemyśle oraz przedstawiono wpływ różnych czynników na efektywność stosowanych układów. W kolejnych rozdziałach opisano jak kształt elektrod padów elektroadhezyjnych wpływa na moment trzymający siły elektrostatycznej. Zaprezentowano uzyskane wstępne wyniki badań zależności temperatury, ciśnienia oraz wilgotności na siłę elektroadhezyjną. Przedstawiono schemat blokowy układu pomiarowego oraz przekrój pada adhezyjnego. Zaproponowano również kierunek dalszych badań nad zjawiskiem elektroadhezji.

Abstract. The article presents a physical description of the phenomenon of electroadhesion. Its application in industry was presented and the influence of various factors on the efficiency of applied systems was presented. The following chapters describe how the shape of the electrodes of the electroadhesive pads affects the moment holding the electrostatic force. The preliminary results of studies on temperature, pressure and humidity dependence on the electroadhesion force were presented. The block diagram of the measurement system and the adhesive pad cross-section are shown. The direction of further research on the phenomenon of electroadhesion has also been proposed. (The influence of the shape of electrodes of electroadhesive on the momentary holding of electrostatic force).

Słowa kluczowe: elektroadhezja, przyciąganie, pad elektroadhezyjny, pole elektromagnetyczne.

Keywords: electroadhesion, attraction, electroadhesive pad, electromagnetic field .

Wstęp

Zjawisko adhezji to oddziaływanie międzycząsteczkowe, które polega na przyciąganiu i przyleganiu do siebie powierzchniowych warstw dwóch różnych ciał (ciał stałych lub ciekłych)]. Adhezja jest zjawiskiem bardzo powszechnym zarówno w środowisku naturalnym jak i związanym z działalnością człowieka. Wykorzystywana jest w wielu gałęziach gospodarki - w przemyśle, rolnictwie czy rozrywce. Jej zastosowanie jest bardzo szerokie np. przy klejach adhezyjnych, farbach, foliach adhezyjnych, czyli karteczkach oraz taśmach samoprzylepnych [1, 2]. W przyrodzie niektóre zwierzęta wykorzystują adhezję do poruszania się po pionowych gładkich powierzchniach, liściach lub drzewach.

Elektroadhezja i jej możliwości aplikacyjne

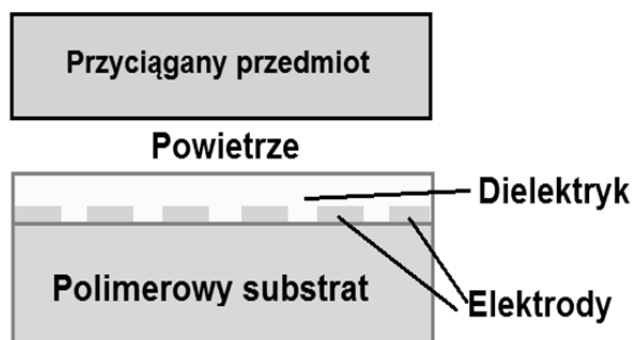
Zjawiskiem ściśle związanym z adhezją jest elektroadhezja. Efekt przyciągania i przywierania różnych materiałów do siebie wywołany jest polem elektromagnetycznym. Odpowiednią siłę elektroadhezyjną możliwą do wykorzystania można uzyskać dzięki specjalnym padom elektroadhezyjnym. Są to np. płytki PCB lub inny materiał posiadający dużą stałą dielektryczną np. elastomery czy materiały polimerowe. Na padzie elektroadhezyjnym znajdują się dwie miedziane elektrody, do których podłącza się różne potencjały prądu stałego. Wysokie napięcie między elektrodami generuje powstanie siły zdolnej do przyciągania obiektów o różnej wielkości. Im większa różnica potencjałów tym pad przyciąga cięższy przedmiot lub z większej odległości [3-5].

Na rysunku 1 przedstawiono przekrój pada elektroadhezyjnego. Składa się on z polimerowego substratu, na którym znajdują się dwie miedziane elektrody. Jako warstwę ochraniającą pad stosuje się dielektryk. Między padem a przyciąganym elementem znajduje się powietrze.

Istotnym elementem konstrukcyjnym padów jest powłoka pokrywająca elektrody. Tu również ważna jest duża wartość stałej dielektrycznej materiału powierzchniowego, aby nie doprowadzić do wyładowań snopiących lub przebicia całego układu przy wysokich napięciach.

Wykorzystanie zjawiska elektroadhezji niesie za sobą wiele potencjalnych możliwości rozwoju technologicznego. Badania nad zwiększeniem efektywności już używanych

urządzeń mają również uzasadnienie ekonomiczne. Elektroadhezja wykorzystywana jest w przemyśle do przenoszenia elementów elektronicznych lub materiałów tekstylnych [6, 7]. W rolnictwie wykorzystuje się ją do zbierania owoców.



Rys. 1. Schemat poglądowy przekroju pada elektroadhezyjnego

W celach naukowych, stworzono latającego robota, kształtem zbliżonego do owada, który posiada pad adhezyjny, dzięki któremu jest w stanie podnosić niewielkie przedmioty lub przyczepić się do danego podłoża [8, 9].

Dotychczasowe eksperymenty

Na uniwersytecie Loughborough w Wielkiej Brytanii, dr J. Guo wraz z zespołem naukowców przeprowadził badania zależności temperatury, ciśnienia oraz wilgotności powietrza na trzech różnych materiałach [7]. Badania wykazały również, zależność siły elektroadhezyjnej od materiału, na który oddziałuje oraz giętkości samego pada elektroadhezyjnego [10-12]. W tym celu użyto płyty akrylowej, płyty z poliwęglanu oraz hartowanego szkła. Eksperyment przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych utrzymując w pomieszczeniu temperaturę 20,9°C, wilgotność powietrza 39% i ciśnienie 1013 hPa. W drugim eksperymencie zmieniono temperaturę na 21,1°C, wilgotność na 49%, a ciśnienie na 1008 hPa. Pomiaru były przeprowadzane zwiększając napięcie od 0 do 20 kV, z krokiem 1,2 kV. W tabeli 1 przedstawiono siłę

elektroadhezyjną mierzoną w Newtonach dla dwóch wariantów warunków panujących w pomieszczeniu [13, 14].

Tabela 1. Wyniki pomiarów dla dwóch wariantów warunków panujących w pomieszczeniu dla akrylu, szkła oraz poliwęglanu [14].

Warunki panujące w pomieszczeniu:	Akryl	Szkło	Poliwęglan
Temp.: 20,9°C Ciśn.: 1013 hPa Wilg.: 39%	1,6 N	4,5 N	5 N
Temp.: 21,1°C Ciśn.: 1008 hPa Wilg.: 49%	1,7 N	5,25 N	0,55 N

Wyniki dla dwóch wariantów warunków panujących w pomieszczeniu znacznie się różnią. W przypadku wyników otrzymanych dla poliwęglanu te różnice są najbardziej widoczne. Wzrost temperatury z 20,9°C na 21,1°C oraz zmniejszenie ciśnienia z 1013 hPa na 1003 hPa spowodował spadek siły elektroadhezyjnej.

Zmierzono również ciśnienie panujące pomiędzy padem elektroadhezyjnym a badanym komponentem przy napięciu 20kV. Po przeprowadzeniu badania z płytą akrylową, ciśnienie wynosiło 46,3 Pa, z poliwęglanem 15,7 Pa, natomiast po przeprowadzeniu badania z hartowanym szkłem otrzymano wynik aż 123,4 Pa. Najbardziej siłą elektroadhezyjną oddziaływała na poliwęglan. Szkło wykazało najlepszą podatność na działanie siły elektroadhezyjnej. Wynika to z tego, że dielektryk ze szklanego substratu jest wrażliwy na zmiany wilgotności [14].

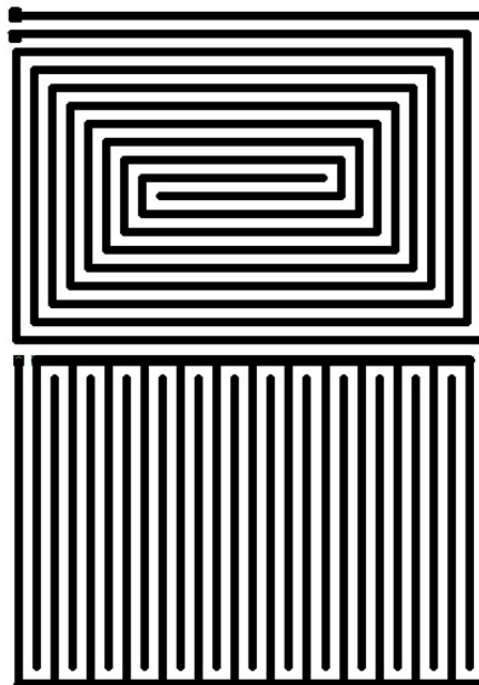
Do tej pory nie stwierdzono wyraźnego związku między wilgotnością, temperaturą i ciśnieniem powietrza, a siłą elektroadhezyjną. Dużym problemem jest niezależnie kontrolować dane warunki (temperaturę, ciśnienie oraz wilgotność), dlatego konieczne są, zatem przyszłe prace w tym zakresie.

Kolejnym eksperymentem wymienionych wyżej naukowców było zbadanie materiałów w różnym stopniu gramatury [15]. W tym celu uszkodzono (zarysowano) powierzchnię badanych materiałów, takich jak aluminiowe płytki oraz papiery ściernie na bazie węgla krzemowego. Rezultatem zarysowania powierzchni badanych materiałów było efektywniejsze przyciąganie przez pad dzięki szczelinom powietrznym między zarysowaniami. Siły międzyfazowe wzrastały wraz ze zmniejszającym się S_q (średnia kwadratowa wysokość) na próbkach papieru [15]. Badania te zostały przeprowadzone podnosząc napięcie od 2 kV do 6 kV. Wygenerowanie większego S_q spowodowało tworzenie się mniejszej szczeliny powietrznej, a większe napięcie, większy wzrost siły elektroadhezyjnej.

Metodologia badań

Elektroadhezja jest zjawiskiem fizycznym, które nie jest do końca zbadane. Jest znane od lat 60 ubiegłego wieku jednakże dostępna literatura nie wyjaśnia wszystkich problemów, które pojawiają się w momencie implementacji tych rozwiązań technologicznych do przemysłu czy rolnictwa. Celem badań jest poznanie działania zjawiska elektroadhezji i zastosowanie go w praktyce oraz zbadanie, jaki wpływ na działanie prądu adhezyjnego ma przede wszystkim kształt elektrod i związany z nim kształt pola elektromagnetycznego oraz jego rozkład [16]. Na rysunku 2 przedstawiono układy elektrod na padach elektroadhezyjnych w kształcie grzebienia oraz spirali wykorzystane we wstępnych badaniach. Szerokość elektrody to około 1 mm, natomiast odstęp między elektrodami to około 2 mm.

Po zasileniu płytki elektroadhezyjnej napięciem 5 kV papierki umieszczone na teflonowym podłożu zostały przyciągnięte do powierzchni pada z odległości około 1 cm. Uzyskane wstępne wyniki nie wykazały zauważalnej różnicy między przyciąganiem się kawałków papieru do powierzchni z grzebieniową elektrodą lub spiralną. Aby określić precyzyjnie wpływ zastosowanego kształtu i ułożenia elektrod względem siebie należy zmierzyć siłę elektroadhezyjną wytworzoną w jednakowych warunkach metrologicznych.



Rys.2. Schemat układu elektrod w kształcie spirali oraz grzebienia, wykorzystywanych w badaniach

Nie wyjaśniono wpływu wielu czynników na uzyskiwany moment trzymający siły elektroadhezyjnej. Nie ma dokładnych badań określających wpływ kształtu pola elektromagnetycznego na względną wartość uzyskiwanej siły zdolnej do przytrzymywania różnych obiektów.

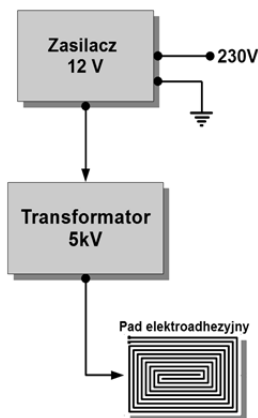
Układ pomiarowy oraz wyniki wstępnych badań

Wstępne badania rozpoczęto od analizy czynnika mającego największy wpływ na osiągnięte wyniki, czyli od napięcia przyłożonego między elektrodami. W przemyśle oraz rolnictwie do zasilenia padów elektroadhezyjnych wykorzystywane jest napięcie 20 kV [9, 17].

W trakcie badań obniżono napięcie z 20 kV do 5 kV. Pomimo znacznie niższego napięcia udało się uzyskać siłę zdolną przyciągnąć niewielkie przedmioty dzięki odpowiedniemu kształtowi oraz grubości elektrod.

Układ pomiarowy składa się z zasilacza 12 V podłączonego do sieci oraz z zasilacza, który posłużył, jako transformator do uzyskania wysokich napięć. Pad został zasilony z transformatora napięciem 5 kV. W badaniach użyto dwóch padów o różnym układzie elektrod (rys.2). Rysunek 3 przedstawia schemat blokowy układu pomiarowego użytego w badaniach.

Pad elektroadhezyjny lub inaczej płytka adhezyjna zastosowana w tym układzie to elastyczna płytka PCB o grubości 0,4 mm oraz wymiarach 7 cm na 5 cm. Jako przyciągany przedmiot użyto okrągłych papierków o średnicy 5 mm oraz różnej gramaturze papieru.



Rys.3. Schemat blokowy układu pomiarowego

Wnioski oraz kolejne etapy badań

Można uzyskać siłę elektroadhezyjną mając do dyspozycji tylko 5 kV. Pady o różnym kształcie elektrod przyciągnęły materiał z tej samej odległości. Inny efekt można by uzyskać stosując pady o znacznie szerszych elektrodach oraz innym kształcie. W przyszłości będą przeprowadzone badania nad zwiększeniem napięcia na elektrodach w celu przyciągnięcia cięższych przedmiotów i z większej odległości.

Badania wykazały, że na intensywność działania zjawiska elektroadhezji oddziałują czynniki zewnętrzne. Zmierzono, w jakim stopniu pad elektroadhezyjny przyciągnie poliwęglan, akryl oraz szkło w różnej temperaturze, ciśnieniu oraz wilgotności powietrza w pomieszczeniu. Zbadano również, jakie ciśnienie wytwarza się między padem a przyciąganym kompozytem. Rezultatem eksperymentu było wygenerowanie większej siły elektroadhezyjnej w przypadku, gdy ciśnienie jest większe. Zależy to również od rodzaju przyciąganego materiału. Wykazano, że im mniejsze S_q (średnia kwadratowa wysokość) tym siły międzyfazowe są większe [15].

Warto zająć się zjawiskiem elektroadhezji, ponieważ nie jest do końca przebadane, a posiada duże możliwości aplikacyjne. Szeroko stosowane w przemyśle oraz rolnictwie, pozwala na wygodniejsze przenoszenie, chwytanie oraz zbieranie. Pomimo wielu rozwiązań, należy opracować skuteczny model pada, odpornego na wpływ warunków zewnętrznych czy zmienność napięcia podawanego na elektrody. Warunki panujące w pomieszczeniu mają istotny wpływ na zmienność siły elektroadhezyjnej.

Kolejnym etapem badań będzie udoskonalenie układu o siłomierz lub bardzo dokładną wagę. Pozwoli to na dokładniejsze zmierzenie, z jaką siłą pad elektroadhezyjny przyciąga przedmioty. Pomiar będą prowadzone w warunkach laboratoryjnych, aby zbadać, jaki wpływ na zjawisko elektroadhezji ma temperatura, ciśnienie oraz wilgotność powietrza oraz zmiany tych parametrów również względem siebie. Zbadane zostanie również czy przy większym napięciu niż 5 kV oraz zastosowaniu innych kształtów elektrod np. o szerszych elektrodach niż dotychczas były stosowane, siła elektroadhezyjna będzie w stanie przyciągnąć cięższe przedmioty z większej odległości. Kolejnym etapem prac będzie dobranie odpowiedniego materiału do zastosowania jak powłoki (dielectric cover) dielektrycznej pokrywającej elektrody.

Autorzy: mgr. inż. Wiktoria Kalus, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnych, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: wiktoria.kalus92@gmail.com; dr inż. Łukasz Nagi, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnych, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: l.nagi@po.opole.pl

LITERATURA

- [1] Ruffatto D., Parness A., Spenko M., Improving controllable adhesion on both rough and smooth surfaces with a hybrid electrostatic / gecko-like adhesive, *Journal of the Royal Society*, 11 (2014),
- [2] Prahlad H., Pelrine R., Stanford S., Marlow J., Kornbluh R., Electroadhesive robots - Wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2008), 3028-3033
- [3] Vankov A., Huie P., Blumenkranz M., Palanker D., Electro-adhesive forceps for tissue manipulation, *Conference Ophthalmic Technologies XIV*, 5314 (2004), 270-275
- [4] Berengueres J., Urago M., Saito S., Tadakuma K., Meguro H., Gecko inspired electrostatic chuck, *2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2006*, (2006), 1018-1023
- [5] Cao C., Sun X., Fang Y., Qin Q., Yu A., Feng X., Theoretical model and design of electroadhesive pad with interdigitated electrodes, *Materials and Design*, 89 (2016), 485-491
- [6] Téllez J. P. D., Krahn J., Menon C., Characterization of Electro-adhesives for Robotic Applications, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, (2011), 1867-1872
- [7] Monkman G., Monkman G., Electroadhesive microgrippers, *Industrial Robot: An International Journal*, 30 (2003), n.4, 326-330
- [8] Farnworth G. J. M. P. M. T. G. J., Monkman G. J., Taylor P. M., Farnworth G. J., Principles Of Electroadhesion In Clothing Robotics, *International Journal of Clothing Science and Technology*, (1989)
- [9] Graule M. A., Chirarattananon P., Fuller S. B., Jafferis N. T., Ma K. Y., Spenko M., Kornbluh R., Wood R. J., Perching and takeoff of a robotic insect on overhangs using switchable electrostatic adhesion, *Science*, 352 (2014), n.1122374, 978-982
- [10] Shen H., Liu R., Chen R., He J., Modeling of Attraction Force Generated by Interdigital Electrodes for Electroadhesive Robots, *IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics*, (2012), 678-681
- [11] Jeon J. U., Higuchi T., Electrostatic Suspension of Dielectrics, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 45 (1998), n.6, 938-946
- [12] German J., Schubert B., Floreano D., Stretchable Electroadhesion for Soft Robots, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2014), 3933-3938
- [13] Guo J., Bamber T., Member S., Zhao Y., Chamberlain M., Justham L., Jackson M., Towards Adaptive and Intelligent Electroadhesives for Robotic Material Handling, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3766 (2016), n.c, 1-8
- [14] Guo J., Bamber T., Petzing J., Justham L., Jackson M., Experimental study of relationship between interfacial electroadhesive force and applied voltage for different substrate materials, *Applied Physics Letters*, (2017), n.110, 1-6
- [15] Guo J., Taylor M., Bamber T., Chamberlain M., Justham L., Jackson M., Investigation of relationship between interfacial electroadhesive force and surface texture, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 35303 (2015)
- [16] Bamber T., Guo J., Singh J., Bigharaz M., Petzing J., Bingham P. A., Justham L., Penders J., Jackson M., Visualization methods for understanding the dynamic electroadhesion phenomenon, *Journal of Physics D: Applied Physics*, (2017)
- [17] Monkman G. J., Compliant robotic devices, and electroadhesion, *Robotica*, 10 (1992), n.2, 183-185