



PISMO POLSKIEGO TOWARZYSTWA PRZYRODNIKÓW IM. KOPERNIKA
WYDAWANE PRZY WSPÓŁDZIAŁE: AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ,
MINISTERSTWA NAUKI I SZKOLNICTWA WYŻSZEGO, POLSKIEJ AKADEMII UMIEJĘTNOŚCI

TOM 120
ROK 137

KWIECIEŃ – MAJ – CZERWIEC 2019

ZESZYT 4–6
2664–2666

ADHEZJA W ŚWIECIE ROŚLIN I ZWIERZĄT

Katarzyna Stachowicz (Kraków)

Streszczenie

Aby zrozumieć otaczający nas świat, musimy zrozumieć rządzące nim prawa fizyki. Zjawiskiem fizycznym występującym powszechnie jest adhezja. Adhezja pozwala na utrzymanie kontaktu pomiędzy powierzchniami. Definiowana jest jako proces powierzchniowego łączenia się warstw różnych związków. O sile adhezji świadczy praca przypadająca na jednostkę powierzchni, jaką należy wykonać, aby rozerwać stykające się warstwy. Gekon posługujący się zjawiskiem adhezji w trakcie chodzenia po pionowych powierzchniach nie wydaje się używać zbyt wielkiej siły w trakcie odrywania łapy od podłoża w celu wykonania następnego kroku. Uzyskuje to dzięki ukierunkowanemu ruchowi. Znając takie triki natury możemy wykorzystać je w życiu codziennym, na przykład do wyprodukowania superwytrzymałej taśmy klejącej, utrzymującej kilkusetkilogramowe obciążenie przypadające na kilkucentymetrową powierzchnię. Materiał taki został wyprodukowany w USA, a stworzono go „podglądając” gekona. Materiał ten można odkleić bez użycia dużej siły, przez pociągnięcie w odpowiednim kierunku. Te i inne ciekawostki ze świata przyrody oraz prawa fizyki ukryte pod pojęciem adhezja zostały omówione w niniejszym artykule. Przedstawione zostały zjawiska fizyczne, takie jak napięcie powierzchniowe czy energia powierzchniowa. Następnie zaprezentowano przykłady adhezji w otaczającym nas świecie, zarówno roślin, jak i zwierząt. Na zakończenie omówiono praktyczne wykorzystanie omawianego zjawiska.

Abstract

To understand the world around us, we have to understand laws of physics. One of the physical phenomena occurring universally is adhesion. Adhesion allows for maintaining contact between surfaces. Definition of adhesion presents it as an ability to stick between two different compounds or surfaces. Adhesion can be measured as force needed for bursting sticky surfaces. In animal world, Gecko use adhesion to walk on vertical surfaces. However, if we take a look at Gecko, it looks like it does not need to use too much force to peel off the paw, to make next step. It is possible because of the use of targeted movement. If we can understand this kind of nature tricks, we can avail them in industry. Material scientists in USA produced a super strong adhesive tape, maintaining a load of several hundred kilograms per one centimeter of surface, which can be peeled off

without super force use. This super strong adhesive tape, was produced because of understanding sophisticated rules of physics, applied during Gecko movement. These and other curiosities of nature world and the laws of physics hidden behind the definition of adhesion are presented in this article. The surface tension or surface energy belong to them. Next, examples of adhesion in the world of plants and the world of animals are presented. Finally, practical use of adhesion phenomenon is described.

Adhezja (*adhesio* – przyleganie) – jest to zjawisko fizyczne polegające na łączeniu się ze sobą różnych warstw, faz lub związków. Każdy z nas obserwował krople wody przyklejone do szyby w deszczowy dzień, ale nie zawsze zdajemy sobie sprawę z faktu, że to właśnie adhezja utrzymuje kroplę wody na szkłe. Adhezję, czyli zjawisko powierzchniowe, działające na granicy warstw, należy odróżnić od zjawiska kohezji, które jest łączeniem się ze sobą takich samych cząsteczek, np. jednej cząsteczki wody z kolejną. Adhezja jest więc wynikiem oddziaływań międzycząsteczkowych pomiędzy różnymi cząsteczkami (powierzchniami). Miarą adhezji jest praca, jaką należy wykonać, aby rozdzielić łączące się powierzchnie. W trakcie łączenia się powierzchni może dojść do zjawiska adhezji lub do powstania wiązań chemicznych. Są to procesy bardzo płynne i trudne do uchwycenia, ponieważ atomy w cząsteczkach dążą do energetycznie optymalnego rozmieszczenia elektronów wokół jąder, dlatego też, gdy tylko zaistnieją korzystne warunki do zajścia reakcji, powstaną wiązania chemiczne. Nawet znając podstawy teoretyczne pozwalające na rozróżnienie rodzajów oddziaływań cząsteczkowych (patrz Tabela 1), trudno jest zdefiniować granice pomiędzy adhezją a wiązaniem chemicznym tworzącym się pomiędzy związkami, dlatego też adhezję definiuje się jako odwracalny proces termodynamiczny, wykorzystujący napięcie powierzchniowe na granicy styku warstw [21]. Proces termodynamiczny jest łańcuchem zjawisk fizycznych połączonych z wymianą pracy i ciepła z otoczeniem [22]. Natomiast napięcie powierzchniowe można opisać jako zjawisko fizyczne występujące na powierzchni cieczy, dzięki któremu warstwa graniczna cieczy zachowuje się jak napięta, sprężysta błona, pozwalająca na oddzielenie cieczy od powietrza czy szkła. „Błonka” ta może powstać dzięki sile napięcia powierzchniowego, która jest wypadkową wszystkich oddziaływań międzycząsteczkowych w kropli, a więc tych występujących we wnętrzu kropli oraz tych na jej powierzchni. Napięcie powierzchniowe istnieje zatem dzięki siłom przyciągania pomiędzy cząsteczkami. Wysokie napięcie powierzchniowe świadczy o tym, iż siły kohezji przeważają siły adhezji na granicy faz. Napięcie powierzchniowe podlega zmianom w zależności od warunków środowiska,

w którym występuje, stąd możemy go obniżyć zwiększając temperaturę [21], co w konsekwencji wpływa również na adhezję. Na adhezję możemy wpływać dodatkowo wywierając na ciecz ciśnienie – w ten sposób wpływamy na objętość cieczy, a co za tym idzie, na jej powierzchnię. Ponieważ napięcie powierzchniowe jest stosunkiem wartości siły, z jaką warstwa powierzchniowa cieczy działa na ograniczającą ją krawędź, do długości tej krawędzi [23], stąd jeśli zadziałamy ciśnieniem na kroplę, to zmienimy jej powierzchnię, co z kolei wpłynie na siły działające na krawędzie, a w konsekwencji modyfikacji ulegną parametry adhezji. Doświadczalnie udowodniono, iż adhezja jest wprost proporcjonalna do rzeczywistego obwodu kontaktu, ale nie jest proporcjonalna do obszaru kontaktu [20]. Oznacza to tyle, iż na danej powierzchni mogą znajdować się miejsca silniej lub słabiej adherujące, zaś adhezja całej powierzchni będzie wypadkową wszystkich tych punktów kontaktu. Aby to zrozumieć, musimy sobie wyobrazić powierzchnię nie jako gładką warstwę widoczną w skali naturalnej, ale jako obraz na tyle powiększony mikroskopowo, aby dostrzec nierówności tej gładkiej powierzchni w skali nano – dostrzeżemy wówczas miejsca silniej i słabiej adherujące. Omówione powyżej zmiany warunków fizycznych, takich jak temperatura czy ciśnienie, mogą wpływać na pole powierzchni kropli tylko dlatego, że cząsteczki cieczy połączone są słabymi siłami oddziaływań międzycząsteczkowych, w wyniku czego mogą się swobodnie przemieszczać (to samo dotyczy gazów). W cieczy, w momencie przemieszczania się cząsteczek dochodzi do zjawiska podobnego do tarcia, tzw. tarcia wewnętrznego. Tarcie wewnętrzne cieczy zwane jest również lepkością cieczy. Lepkość cieczy określa współczynnik lepkości η i jest on różny dla różnych cieczy [10], tym samym różne ciecze będą wykazywały różne parametry adhezji.

Nieco inaczej zachowują się ciała stałe, co wynika z ich odmiennej budowy. W przeciwieństwie do słabych sił oddziaływań międzycząsteczkowych cieczy, pomiędzy cząsteczkami ciała stałego występują duże siły oddziaływań międzycząsteczkowych. Decydują one o kształcie siatki krystalicznej danego metalu czy związku chemicznego. Na ciała stałe, podobnie jak na ciecze, możemy działać siłą zewnętrzną. Jednakże

wywierając na ciało stałe siłę zewnętrzną (ciśnienie) powodujemy jego odkształcenie. Odkształcenie ciała stałego jest możliwe dzięki właściwościom sprężystym ciała stałego. W roku 1660 Robert Hooke

Tabela 1. Charakterystyka i podział oddziaływań międzycząsteczkowych oraz wiązań chemicznych.

<p style="text-align: center;">ODDZIAŁYWANIA MIĘDZYCZĄSTECZKOWE</p> <p style="text-align: center;">↓ ↓</p> <p>Sily van der Waalsa Wiązania wodorowe</p>	<p style="text-align: center;">WIĄZANIA CHEMICZNE</p> <p style="text-align: center;">↙ ↓ ↘</p> <p>Atomowe Jonowe Metaliczne</p>
<p style="text-align: center;">ODDZIAŁYWANIA MIĘDZYCZĄSTECZKOWE:</p> <p>Sily van der Waalsa – są to słabe oddziaływania międzycząsteczkowe o charakterze elektrostatycznym, występujące pomiędzy niepolarnymi cząsteczkami jak CH_4 lub pomiędzy nie wiążącymi się cząsteczkami gazów szlachetnych. Sily van der Waalsa utrzymują również cząsteczki kryształów molekularnych takich jak jod. Na skutek ciągłego ruchu elektronów i oscylacji jąder, ładunki czasowo polaryzują tworząc indukowane chwilowe dipole, co pozwala na powstanie i utrzymanie sił van der Waalsa. Dipol elektryczny jest to układ dwóch ładunków różnoimiennych znajdujących się w pewnej odległości od siebie.</p> <p>Wiązania wodorowe – są to słabe oddziaływania pomiędzy atomem wodoru a pierwiastkiem o dużej elektroujemności jak tlen, chlor, czy fluor. Wiązania wodorowe powstają np. pomiędzy cząsteczkami wody, gdzie silnie spolaryzowane wiązanie pomiędzy atomem tlenu a wodoru powoduje, iż dodatnio naładowany wodór jest przyciągany przez kolejną cząsteczkę wody, tworząc wiązanie wodorowe z tlenem ($\text{H-O-H} \cdot \cdot \cdot \cdot \text{OH}_2$). Wiązania wodorowe występują nie tylko w cząsteczkach wody, ale również w białkach decydując o ich budowie przestrzennej.</p> <p style="text-align: center;">WIĄZANIA CHEMICZNE:</p> <p>Wiązania atomowe (kwalencyjne) – powstają pomiędzy atomami pierwiastków o podobnej elektroujemności. Wyróżniamy wiązania kwalencyjne niespolaryzowane oraz wiązania kwalencyjne spolaryzowane. Wiązanie kwalencyjne niespolaryzowane powstaje pomiędzy atomami tego samego pierwiastka np. H_2, O_2. W wiązaniu niespolaryzowanym para elektronowa należy w równym stopniu do obydwu atomów. Wiązanie kwalencyjne spolaryzowane powstaje pomiędzy różnymi atomami o zbliżonej elektroujemności, elektrony przesunięte są w kierunku jednego z atomów.</p> <p>Wiązania jonowe – powstają pomiędzy przeciwnie naładowanymi atomami (kationami i anionami) na skutek występowania pomiędzy nimi siły elektrostatycznej. Zdolność jonu do tworzenia wiązania jonowego określa jego elektrowartościowość. Elektrowartościowość jest równa ładunkowi jonu. Jony łączą się ze sobą tak aby wypadkowy ładunek kryształu wynosił zero. Na skutek powstania wiązania jonowego powstają związki jonowe np. chlorek sodu.</p> <p>Wiązania metaliczne – sieć krystaliczna metali składa się z kationów i swobodnie poruszających się elektronów. Elektrony swobodne tworzą wiązania (metaliczne) z jonami sieci krystalicznej. Ponieważ elektrony swobodne mogą poruszać się po całej sieci krystalicznej, jej cechą charakterystyczną jest zdolność przewodzenia elektryczności, oraz ciepła. Wiązania metaliczne są bardzo silne.</p> <p style="text-align: right;">[17; 21; 22; 29]</p>	

sformułował prawo, nazwane obecnie prawem Hooke’a. Prawo Hooke’a definiuje zależność pomiędzy odkształceniem ciała sprężystego, a siłą powodującą to odkształcenie i mówi ono wprost, iż odkształcenie ciała stałego jest proporcjonalne do wywieranego na nie ciśnienia [10].

Omówione powyżej własności cieczy oraz ciał stałych, a także zjawiska fizyczne mają istotny wpływ na zachowanie się powierzchni adhezyjnej, jakkolwiek stanowią jedynie podstawowe informacje pozwalające zrozumieć to zjawisko. Nie wyczerpują jednak tematu i śmiało można stwierdzić, iż stanowią tzw. wierzchołek góry lodowej zagadnień, które powinniśmy poznać. Problem ten bardzo ciekawie ukazuje artykuł: „Od gekona do splątania kwantowego, czyli z naddźwiękową prędkością od molekuł do atomów” [24].

Adhezja w świecie roślin

Zjawisko adhezji w świecie roślin jest bardzo powszechne. Pobieranie wody i rozprowadzanie jej po roślinie możliwe jest dzięki współistnieniu zjawiska kohezji i adhezji. Cząsteczki wody łącząc się ze sobą wykorzystują zjawisko kohezji, tworząc warstwę, która dzięki zjawisku adhezji przylega do warstwy rośliny [21]. Zjawisko to możemy zaobserwować w trakcie deszczu lub podczas zraszania roślin domowych, gdy na liściach leżą przyklejone krople wody (Ryc. 1), jak również o poranku, kiedy zaistnieją odpowiednie warunki do powstania rosy. Adhezję można zaobserwować również we wnętrzu rośliny. Utworzona dzięki kohezji warstwa wody pozostaje w adhezyjnej interakcji z wewnętrzną warstwą rośliny. W roślinach kapi-



Zdjęcie: Katarzyna Stachowicz,
Instytut Farmakologii imienia Jerzego Maja Polskiej Akademii Nauk

Ryc. 1. Krople wody na liściu Skrzydłokwiatu (*Spathiphyllum*).

larnych jest to kapilara, w której dzięki istnieniu kolejnych sił fizycznych, takich jak ciśnienie osmotyczne, woda zostaje rozprowadzona po wnętrzu rośliny.

Adhezja w świecie roślin związana jest nie tylko z transportem i wchłanianiem wody, ale również uczestniczy w scalaniu komórek roślinnych. Ściany komórkowe roślin uczestniczące we wzroście komórek

roślinnych, zwane pierwotnymi ścianami komórkowymi, zbudowane są z nierozpuszczalnych w wodzie fibryl celulozowych, osadzonych w uwodnionych polisacharydach: hemicelulozach oraz pektynach [19]. Badania przeprowadzone przez Iwai i wsp. (2002) [7] wykazały, iż pektyny są cząsteczkami adhezyjnymi scalającymi komórki roślinne, a swoje właściwości zawdzięczają obecności enzymów glukuronilotransferaz, których brak prowadzi do zaburzonego kontaktu pomiędzy komórkami, a w konsekwencji nieprawidłowego wzrostu oraz budowy rośliny [7, 9].

Pułapki adhezyjne są kolejnym przykładem wykorzystywania zjawiska adhezji przez rośliny. Stosują je rośliny z grupy drapieżnych, zwane mięsożernymi czy roślinami zabójcami [25]. Bardzo ciekawą pułapkę adhezyjną wykształciła znana nam wszystkim i popularna Rosiczka (*Drosera L.*). Do rodziny rosiczkowatych należy prawie 190 gatunków, rozsianych po całym świecie [21]. Jednakże bez względu na miejsce występowania, adaptacje środowiskowe czy różnoraki wygląd, wszystkie rosiczki wydzielają lepki śluz, do którego przyklejają się owady (Ryc. 2) [25].



Zdjęcie: [https://pixabay.com/pl/fotografia-roziczka](#)
licencja: darmowy do użytku komercyjnego

Ryc. 2. Rosiczka (*Drosera intermedia*).

Adhezja w świecie zwierząt

Adhezję w świecie zwierząt możemy zaobserwować już u tak prostych organizmów jak ryjkołowy (*Kinorhyncha*). Są to morskie bezkręgowce drapieżne wielkości 0,2–1 mm. Ryjkołowy zamieszkują wszystkie oceany świata, żywią się składnikami

mułu, między innymi okrzemkami. Brzuszną część ciała rykoglówów pokrywają narządy adhezyjne, wydzielające lepka substancję, dzięki której bezkręgowce te mogą przyczepiać się do podłoża [3].

Adhezję można wykorzystać również w inny sposób. Przędza wytwarzana przez pająki posiada właściwości adhezyjne. Każdy z nas widział owady złapane w lepka sieć pajęcza, jednak nie zawsze wiemy, dlaczego sieć ta potrafi skleić owada. Sieć pajęcza składa się z włókien białek fibrylarnych (fibroin), sklejonych substancją o własnościach adhezyjnych – serycyną. Serycyna zwana jest klejem jedwabnym i stanowi główny składnik sklejący nici przędnej stawonogów. Serycyna jest również składnikiem nici jedwabnej u jedwabników. Serycyna składa się między innymi z seryny, glicyny i kwasu asparagowego, zawiera również reszty cukrowe. Adherentne własności zawdzięcza fragmentom polarnym, które dzięki rozmieszczeniu ładunków elektrycznych otaczają inne cząsteczki [4, 21]. Pająki wykorzystują zjawisko adhezji nie tylko do sklejanja ofiar w sieci pajęczej, ale również do poruszania się po śliskich powierzchniach [4, 21].

Zjawisko adhezji w świecie zwierząt nie polega wyłącznie na wytwarzaniu kleju, wykorzystującego właściwości wody i napięcia powierzchniowego. Bardzo ciekawą formę adhezji zaobserwowano u gekonów (Ryc. 3). Gekonowate, gekony (*Gekkonidae*) są gadami o prymitywnej budowie. Gekony należą do grupy jaszczurek (gadów łuskonośnych) [21] które, w porównaniu do innych przedstawicieli



Ryc. 3. Gekon orzęsiony (*Rhacodactylus cilliatius*).

tego gatunku, posiadają niezwykłą umiejętność: gekon potrafi poruszać się po pionowych, śliskich powierzchniach, chodzić po suficie oraz wisieć na nim. Wiadomym jest, iż jakkolwiek byśmy nie dociskali do powierzchni materiału, który nie posiada właściwości adhezyjnych, nie dojdzie do „sklejania” – jak w takim razie robi to gekon? Fenomen ten jest możliwy dzięki specjalistycznej budowie łapy

gekona (Ryc. 4). Palce gekona są spłaszczone, co jest przyczyną zwiększenia powierzchni stykowej. W dodatku spodnia strona palców gekona zbudowana jest z tzw. *Lamellae* (Ryc. 5), charakterystycznych blaszek pokrytych milionami wyrostków skórnych



Ryc. 4. Łapa gekona orzęsionego (*Rhacodactylus cilliatius*).

(*setae*), a te z kolei zakończone są łopatkami (*spatulae*). Taka budowa zwiększa powierzchnię styku do maximum, pozwalając „wniknąć” wyrostkom łapy w najmniejszą nierówność powierzchni, kontaktując się z powierzchnią na poziomie nano skali [21; 22]. Jednakże nawet taka budowa łapy gekona nie tłumaczy wytworzenia tak dużej siły, która byłaby w stanie utrzymać ciężar gekona. Badania nad mechanizmem „przyczepności gekona” trwają już od roku 1900. Wtedy właśnie Anton Haase pierwszy zasugerował, iż gekon „przykleja się” poprzez działanie sił międzycząsteczkowych (adhezyjnych) [1]. Od tego czasu naukowcy wykluczyli szereg pomysłów, które zdawały się tłumaczyć „przyczepność” gekona. Wykluczono między innymi: klejenie, tarcie, przyssanie czy przyczepianie [1]. Badania wskazują, iż pomiędzy łapą gekona a powierzchnią, po której się on przemieszcza, działają siły van der Waalsa [1, 2]. Ponadto przyczepność gekona jest tak skuteczna, ponieważ posiada on zdolność „samosuszenia”, czyli usunięcia kropelek wody z pomiędzy wyrostków na łapie (woda zmniejsza przyczepność łapy gekona) [16]. Posiada on również zdolność „preładowania” (preloading) wyrostków skórnych (*setae*), tak aby dopasować ułożenie każdego z wyrostków łapy w sposób maksymalny do danej powierzchni [2].

Zjawisko adhezji możemy zaobserwować także w organizmie ludzkim na poziomie komórkowym. Okazuje się, że dzięki zdolnościom adhezyjnym bakterie chorobotwórcze z grupy *Escherichia coli* (*E. coli*), odpowiedzialne za zakażenia jelitowe (tzw. enteropatogeny), są w stanie skolonizować jelita, doprowadzając do powstawania biegunek [11].

Escherichia coli jest szczepem bakterii tzw. fizjologicznej flory jelit, zarówno u ludzi, jak i u zwierząt, jednak 6 grup z tej rodziny określono jako tzw. szczepy patogenne [11]. W zależności od szczepu bakterie te posiadają różne rodzaje białek o zdolnościach adhezyjnych, ułatwiających im kolonizację jelit. U szczepu enteropatogennych *E. coli* są to na przykład fimbrie, czynnik Efa1/LifA oraz intimina [11]. Generalnym mechanizmem pozwalającym na wykorzystanie zdolności adhezyjnych, a w konsekwencji

CAMs z grupy neuronalnych białek adhezyjnych, tzw. NCAM (ang. *neural cell adhesion molecule*), odgrywają bardzo ważną rolę w plastyczności mózgu. Ich znaczenie udowodniono nie tylko w neurogenezie, a więc w procesie dojrzewania mózgu, ale również w procesach plastycznych odpowiadających za funkcjonowanie naszej pamięci [5, 6, 8, 14]. W badaniach własnych odkryliśmy istotny wpływ regulacji transmisji glutaminianergicznej oraz regulacji szlaku cyklooksygenaz-2 (COX-2) na poziom białek nale-



Ryc. 5. Palec gekona – widok z mikroskopu skaningowego.

zasiedlenie jelit, jest zdolność szczepów chorobotwórczych do tworzenia tzw. filmu na powierzchni komórek gospodarza [11]. Film jest to adherentna warstwa bakterii, skupiająca się w konkretnym miejscu jelit, rozrastająca się i umożliwiającą patogenom przedostanie się, czyli penetrację w głąb tkanek (tzw. zakotwiczenie). Organizm nie jest jednak bezbronny i bezwolny w stosunku do patogenów. Okazuje się, iż mechanizmy adhezyjne w organizmie ludzkim oraz zwierzęcym odpowiadają za tworzenie tzw. sieci zewnątrzkomórkowych, wyłapujących i unieszkodliwiających patogeny [12].

Mechanizmy adhezyjne zostały odkryte również w badaniach nad nowotworami. Okazuje się, iż adhezja odgrywa bardzo istotną rolę w procesach wzrostu, różnicowania i migracji komórek [26, 18]. W zdrowym organizmie białka adhezyjne CAMs (Cell Adhesion Molecules) odpowiadają za integralną budowę oraz komunikację pomiędzy komórkami. Zauważono zbieżność pomiędzy inwazyjnością nowotworów a ilością tych białek na powierzchni komórek. Ponieważ przechodzenie komórek nowotworowych do naczyń krwionośnych oraz limfatycznych (a w konsekwencji stopień inwazyjności nowotworu) zachodzi wtedy, gdy zaburzona jest integracja, czyli spójność międzykomórkowa, a tym samym także adhezja, wysunięto wniosek, iż CAMs mogą być związane z inwazyjnością nowotworów. Dlatego też badania nad białkami adhezyjnymi niosą nadzieję na nową terapię przeciwnowotworową [26, 18].

żących do grupy CAMs, tzw. białek DSCAM (Down Syndrom Cell Adhesion Molecule) [15]. Transmisja glutaminianergiczna odpowiada za regulację poziomu glutaminianu (głównego neurotransmitera pobudzającego w mózgu), zaś cyklooksygenaz-2 (COX-2) są białkami indukowanymi w trakcie odpowiedzi immunologicznej. Badania przeprowadziliśmy na myszach i okazało się, iż manipulując transmisją glutaminianergiczną oraz poziomem COX-2, możemy wpływać na poziom białka DSCAM w mózgu myszy. Badania przeprowadzono w korze przedczołowej oraz w hipokampie myszy, a więc w centrach „myślenia i strategii”.

Praktyczne wykorzystanie zjawiska adhezji

Zjawisko adhezji wykorzystywane jest na ogromną skalę między innymi w inżynierii, budownictwie czy włókiennictwie. W inżynierii szczególnie zainteresowanie budzą polimery służące do łączenia powierzchni. W tej dziedzinie obowiązuje pięć teorii adhezji. Teoria mechaniczna, dyfuzyjna, elektryczna, adsorpcyjna oraz teoria oddziaływań chemicznych. Według teorii:

- Mechanicznej – adhezja jest to mechaniczne zakotwiczenie jednego materiału w pory drugiego
- Dyfuzyjna teoria zakłada, że adhezja dwóch materiałów jest spowodowana wzajemną dyfuzją makrocząsteczek dwóch polimerów poprzez granicę faz

- Elektryczna (teoria elektrostatyczna) – mówi o istnieniu podwójnej warstwy elektrycznej na powierzchni pomiędzy połączonymi ciałami stałymi
- Adsorbcyjna (termodynamiczna, zwilżalności, kwasowo-zasadowa) – zakłada, że klej przywiera do powierzchni dzięki działaniu sił międzyatomowych oraz międzycząsteczkowych [13].

W budownictwie stosuje się kleje o różnej wytrzymałości wyprodukowane na podstawie praw rządzących adhezją. Jednym z takich klejów jest poli(katecholo-styren). Zachowuje on swoje właściwości nawet pod wodą. Klej ten został wyprodukowany dzięki obserwacjom małży, które przytwierdzają się do skał dzięki wytwarzanej przez siebie substancji klejącej. Substancją tą jest DOPA (3,4-dihydroxyphenylalanine) [27].

Także wspomniana w streszczeniu na początku artykułu taśma klejąca, wyprodukowana w USA, wykorzystuje własności adhezyjne. Kilkucentymetrowy fragment taśmy potrafi utrzymać ciężar kilkusetkilogramowego obciążenia. Odklejenie jej nie wymaga użycia siły, ale pociągnięcia w odpowiednim kierunku. Planowane jej wykorzystanie to przyklejanie sprzętu elektronicznego we wnętrzach oraz ciężkiego sprzętu medycznego w klinikach [28].

Bardzo ciekawym wykorzystaniem zjawiska adhezji wydaje się zastosowanie kleju jedwabnego, czyli opisanej wcześniej serycyny. Serycyna jest wykorzystywana nie tylko do produkcji jedwabiu, ale również

w przemyśle kosmetycznym do produkcji kosmetyków „odmładzających”, dodatkowo w inżynierii biomedycznej oraz biotechnologii [4]. Jedwabnika udomowiono około trzy tysiące lat p.n.e. w starożytnych Chinach [4]. Na terenie Europy jedwabnik pojawił się bardzo późno, około roku 550. Zgodnie z legendą związane to było z kradzieżą i przemytem kokonów na teren Konstantynopola przez dwóch mnichów. Legenda ta nie znalazła jednak potwierdzenia, gdyż historycy odkryli ślady hodowli jedwabnika na terenie Grecji o wiele wcześniej, mianowicie w IV w. p.n.e. [21]. Niezależnie od drogi, jaką jedwab dotarł do Europy, jest on obecnie produkowany powszechnie oraz chętnie wykorzystywany ze względu na swoje właściwości: jest higroskopijny, wytrzymały mechanicznie, sprężysty oraz posiada własności termoizolacyjne [4]. Główny składnik jedwabiu – serycyna znalazła zastosowanie w przemyśle kosmetycznym dzięki silnym właściwościom nawilżającym oraz wygładzającym. Jest ona składnikiem kosmetyków przeciwstarzeniowych. Ze względu na wytrzymałość, serycyna wraz z fibroiną znalazły zastosowanie jako biomateriały służące do rekonstrukcji naczyń czy kości [4].

Zacytowane przez autorkę wyniki własne stanowią fragment badań wykonanych w ramach grantu przyznanego autorce przez Narodowe Centrum Nauki: UMO-2014/13/D/NZ7/00292

Bibliografia

1. Autumn, K. (2006). How gecko toes stick. *American Scientist*, 94, 124-132.
2. Autumn, K., Liang, Y., Hsieh, S.T., Zesch, W., Chan, W.P., Kenny, T., Fearing, R., Full, R.J. (2000). Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature*, 405, 681-685.
3. Błaszak, Cz. Red. (2009). *Zoologia. Bezkręgowce*. T. 1. Wydawnictwo Naukowe PWN.
4. Grześkowiak, J., Łochyńska, M. (2017). Jedwabnik morwowy (*Bombyx mori*) – znany owad o nieznanym potencjale. *Wiadomości Zootechniczne*, 1, 101-105.
5. Hattori, D., Millard, S.S., Wojtowicz, W.M., Zipursky, S.L. (2008). Dscam-mediated cell recognition regulates neural circuit formation. *Annual Review of Cell Developmental Biology* 24, 597-620.
6. Hortsch, M., Umemori, H. ed. (2009). The sticky synapse: Cell Adhesion Molecules and their role in synapse formation and maintenance. Springer Science & Business Media. 1-453.
7. Iwai, H., Masaoka, N., Ishii, T., Satoh, S. (2002). A pectin glucuronyltransferase gene is essential for intercellular attachment in the plant meristem. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A*. 99, 16319-16324.
8. Kilinc, D. (2018). The Emerging Role of Mechanics in Synapse Formation and Plasticity. *Front. Cell. Neurosci.* 12, 483.

9. Lord, E.M., Mollet, J.C. (2002). Plant cell adhesion: A bioassay facilitates discovery of the first pectin biosynthetic gene. *PNAS* 99, 25, 15843-15845.
10. Massalski, J., Massalska, M. (1973). *Fizyka dla inżynierów, Część I, Fizyka klasyczna*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa
11. Pawłowska, B.K., Sobieszcańska, B.M. (2016). Model patogenezy enteropatogennych szczepów *Esheria coli* – Kluczowa rola adhezji. *Post. Mikrobiol.*, 55, 2, 119-131.
12. Pijanowski, Ł., Homa, J., Chadzińska, M. (2017). Sieci zewnątrzkomórkowe – Powszechny w świecie zwierząt (i roślin?) mechanizm unieszkodliwiania patogenów. *Kosmos problemy nauk biologicznych*. 66, 4 (317), 703-719.
13. Pingot, M. (2012). Oznaczanie stabilności połączeń adhezyjnych kompozytów polimerowych. Instrukcja laboratorium. Politechnika Łódzka 1-16.
14. Stachowicz, K. (2018). The role of DSCAM in the regulation of synaptic plasticity: possible involvement in neuropsychiatric disorders. *Acta Neurobiol Exp (Wars)*. 78(3), 210-219. Review.
15. Stachowicz, K., Misztak, P., Pańczyszyn-Trzewik, P., Rzeźniczek, Sz., Sowa-Kućma, M. (w druku). The effect of MTEP and NS398 on DSCAM expression in the prefrontal cortex and the hippocampus of mice. *GABAA involvement*.
16. Stark, A.Y., Wucnich, N.A., Paoloni, E.L., Niewiarowski, P.H., Dhinojwala, A. (2014). Self-drying: A Gecko's innate ability to remove water from wet toe pads. *PLOS ONE* 9, e101885.
17. Stockley, C., Oxlade, C., Wertheim J. (1999). *Ilustrowany słownik nauki: Fizyka, chemia, biologia*. Wydawnictwo publicat S.A. Poznań
18. Takatsugu, O., Rey-Chen, P., Yingming, L., Jer-Tsong, H. (2004). The role of cell adhesion molecule in cancer progression and its application in cancer therapy. *Acta Biochimica Polonica* 51, 2.
19. Zdzeszyńska, J., Stawska, M., Krystyna Oracz, K. (2016). Rola białek modyfikujących strukturę ściany komórkowej w regulacji kiełkowania nasion. Role of cell wall remodeling proteins in the regulation of seed germination. *Postępy Biologii Komórki*. 43, 4.
20. Varenberg, M., Peressadko, A., Gorb, S., Arzt, E. (2006). Effect of real contact geometry on adhesion. *Appl Phys Lett* 89, 121905.

Źródła internetowe

21. <https://pl.wikipedia.org>
22. <https://encyklopedia.pwn.pl>
23. <http://e-fizyka.info/index.php?t=13&id=96&opis=Napiecie-powierzchniowe>
24. www.fais.uj.edu.pl/documents/41628/527a2fd3-b3d8-4cc0-8cf5-51157adc07ef (Koperski, J. Od gekona do splątania kwantowego czyli z naddźwiękową prędkością od molekuł do atomów.)
25. <https://www.rme.cbr.net.pl/index.php/archiwum-rme/512-maj-czerwiec-nr67/ekologia-i-rodowisko/638-2015-04-27-18-14-56>
26. <https://BioTechnolog.pl>, (Mach, M. (2005). Białka adhezyjne w komórkach nowotworowych.)
27. laboratoria.net/technologie/26990.html
28. <https://materialyinzynierskie.pl>