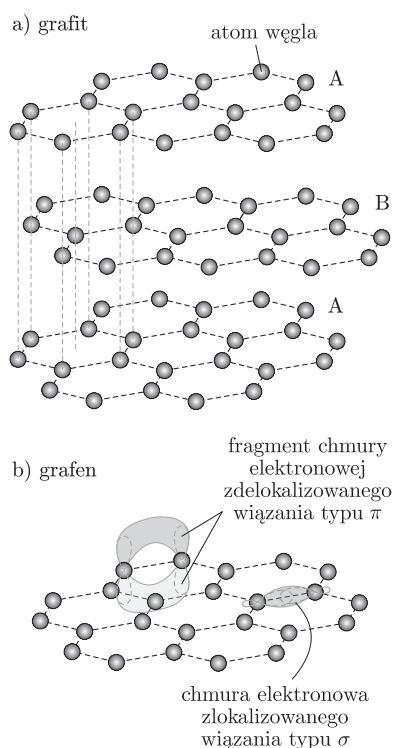


# O tajnikach eksfoliacji, czyli co łączy grafen z odklejaniami etykiet z cenami

Karol NOGAJEWSKI\*



Odklejanie etykiet z cenami lub kodami paskowymi w taki sposób, by nie pozostawiły po sobie żadnych śladów, jest jedną z tych czynności, które potrafią doprowadzić do stanu irytacji niemal każdego. Co ciekawe, niezależnie od stopnia zdeterminowania jednostki, by – mierząc się z takim wyzwaniem – zachować spokój i pełną kontrolę nad wykonywanymi ruchami, przebieg jej zmagania na ogół odtwarza ten sam uniwersalny schemat, po którym zamiast słodczy długo oczekiwanego zwycięstwa należy spodziewać się raczej goryczy kolejnej porażki. Podobnie jak w wielu innych codziennych sytuacjach, tak i tutaj początki złego bywają miłe. Delikatnie podważamy jeden z rogów etykiety, a następnie bardzo wolno odklejamy go od powierzchni przedmiotu, który pragniemy wyzwolić od szpecącej go informacji o cenie czy miejscu zakupu. Mając ten etap za sobą, poprawiamy chwyt i pewni końcowego sukcesu przestajemy zaprzętać sobie głowę cierpliwością, co natychmiast przynosi niepożądany efekt w postaci nieświadomego zwiększenia prędkości odklejania etykiety. Na karę nie trzeba czekać długo, bo oto w najmniej oczekiwanym momencie naklejka, z którą dzielnie walczyliśmy, zaczyna się rozwarstwiać, a jej dolny fragment ani myśli rozstać się z powierzchnią, do której został przyklejony. Odrywamy więc ze złością przytrzymywaną palcami górną część, a po chwili rozpoczynamy opisaną wyżej procedurę od kolejnego rogu, by po niedługim czasie zakończyć ją z równie marnym skutkiem. Po wyczerpaniu zbioru narożników konieczna staje się zmiana strategii – nie ulega bowiem wątpliwości, że stawiający opór centralny skrawek etykiety nie podda się tak łatwo. Ponieważ poziom desperacji sięga na tym etapie zenitu, większość osób porzuca metody łagodnej perswazji i przystępuje do brutalnego zdrapywania resztek pokrytego klejem papieru, wspomagając się przy tym często wodą lub rozpuszczalnikami takimi jak aceton, jeżeli tylko czyszczona powierzchnia sprawia wrażenie odpornej na tego typu traktowanie. Krajobraz po zakończonej tym frontalnym atakem bitwie wygląda dość przygnębiająco: na polu walki nie ma już wprawdzie pozostałości po etykiecie, ale śladów po konfrontacji za to nie brakuje. . .



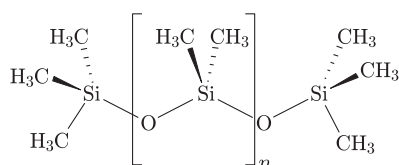
Rys. 1. Wycinek sieci krystalicznej: a) grafitu o uporządkowaniu ABA nazywanym również ułożeniem Bernala, b) grafenu z oznaczonymi schematycznie: fragmentem chmury elektronowej zdelokalizowanego wiązania typu  $\pi$  oraz chmurą elektronową zlokalizowanego wiązania typu  $\sigma$ .

By nie doświadczać na co dzień sytuacji takich, jak ta opisana powyżej z pewną dozą dramaturgii, a tym samym poprawić komfort swojego życia poprzez wyzwolenie go od chwil niepotrzebnej frustracji, warto pochylić się nad głębszym zrozumieniem procesów fizycznych, na których opiera się zasada działania większości taśm klejących, czy też – mówiąc ogólniej – warstw adhezyjnych. Choć zabrzmi to w pierwszej chwili dziwnie, podjęcie takiego wysiłku intelektualnego może zaowocować nawet dokonaniem odkrycia na miarę pierwszych stron najbardziej poczytnych czasopism naukowych jak *Nature* czy *Science*. Przekonali się o tym w 2004 roku dwaj badacze z Uniwersytetu w Manchesterze, Andre Geim oraz Konstantin Novoselov, którzy właśnie za pomocą taśmy klejącej zdołali wyizolować z grafitu płatki złożone z pojedynczej warstwy atomów węgla uporządkowanych przestrzennie w charakterystyczną strukturę plastra miodu [1]. Pionierskie badania właściwości optycznych, elektrycznych, termicznych oraz elastycznych pozyskanego przez nich w ten sposób dwuwymiarowego materiału, który znany jest obecnie szerokim kręgiem jako grafen [2], przyniosły im w 2010 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki.

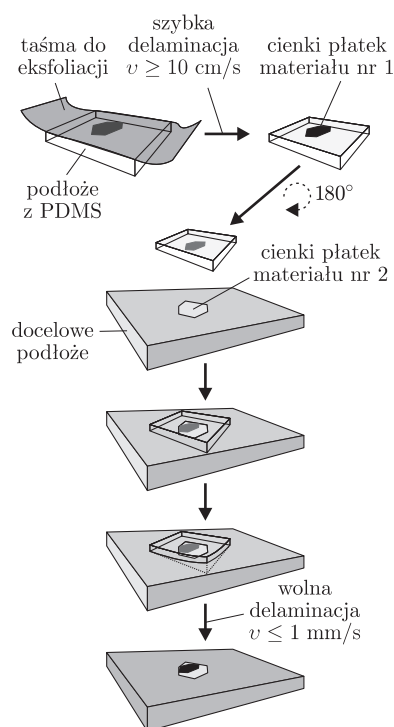
Przedstawiona na rysunku 1 warstwowa budowa grafitu jest następstwem specyficznego kształtu, jaki wskutek tzw. hybrydyzacji  $sp^2$  uzyskują walencyjne powłoki elektronowe tworzących go atomów węgla. Jak odczytać można z układu okresowego pierwiastków, każda z nich jest złożona z czterech tzw. orbitali atomowych (jednego o symetrii  $s$  i trzech o symetrii  $p$ ), które łącznie mogą być „wypełnione” maksymalnie ośmioma elektronami. Zgodnie z kwantowomechanicznym obrazem świata gęstość prawdopodobieństwa

\*absolwent Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, obecnie na stażu doktorskim w Laboratoire des Champs Magnétiques Intenses w Grenoble (Francja)





Rys. 3. Wzór stereochemiczny poli(dimetylosiloksanu).



Rys. 4. Etapy konstrukcji mikrostruktury opartej na stosie cienkich płytek wyizolowanych na drodze eksfoliacji z różnych kryształów objętościowych o warstwowej budowie.

składnikiem wypadkowej siły, za pośrednictwem której oddziałują one z powierzchniami innych ciał jest siła van der Waals'a. Nikogo nie powinno zatem dziwić, że z pomocą tego typu warstw adhezyjnych możliwe jest „odrywanie” cienkich płytek od makroskopowych fragmentów kryształów o warstwowej budowie.

Elastomery łączą w sobie cechy materiałów doskonale sprężystych oraz doskonale lepkich cieczy. Tak jak sugeruje to rysunek 3, wszystkie są polimerami o długich łańcuchach alifatycznych. Na małych odległościach (rzędu kilkukrotnej długości wiązań międzyatomowych) oraz w krótkich skalach czasu ich zachowanie jest praktycznie w całości zdeterminowane przez właściwości sprężyste. Ciekła natura bierze nad nimi górę dopiero na odległościach porównywalnych z długością całej cząsteczki oraz w długich skalach czasu. Z praktycznego znaczenia tej dwoistości oraz jej potencjalnych zastosowań w nanotechnologii zdano sobie sprawę niespełna dekadę temu, kiedy środowisko naukowe usłyszało po raz pierwszy o kinetycznie kontrolowanej sile adhezji (przyczepności) [4]. Pod tą enigmatyczną nazwą kryje się obserwacja, że energia oddziaływania warstw wykonanych z elastomerów, takich jak PDMS, z powierzchniami innych ciał, na których warstwy te zostały umieszczone, zależy od prędkości ich delaminacji, czyli, mówiąc mniej uczenie, zrywania. Jest ona mianowicie tym mniejsza, im wolniej przeprowadzany jest proces separacji obu powierzchni. W takich warunkach cząsteczki elastomerów niczym ciecz odpływają dostojnie z miejsca swojego dotychczasowego pobytu, nie pozostawiając po sobie żadnych śladów. Przy dużych prędkościach delaminacji mogą one natomiast związać się silnie z obiektami, do których przyłgnęły, pozwalając następnie na przenoszenie ich na różne podłoża. W taki właśnie sposób „budowane” są obecnie w laboratoriach mikrostruktury wysokiej jakości złożone z umieszczonych na sobie cienkich płytek rozmaitych materiałów warstwowych, o których była mowa wcześniej (grafenu, heksagonalnego azotku boru, dichalkogenidków metali przejściowych etc.), co zobrazowano schematycznie na rysunku obok. Już pierwsze publikacje [5, 6] pokazały, że prowadzone z ich wykorzystaniem badania naukowe mogą otworzyć drzwi do dużo głębszego zrozumienia niezwykle skomplikowanej fizyki oddziaływań wielociałowych, w tym zjawisk takich jak nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe, a poprzez to przyspieszyć realizację wielu wzniosłych planów poprawy jakości naszego życia, do których przez lata niepowodzeń na gruncie tak poznawczym, jak i technicznym zaczęto podchodzić z bardzo dużym dystansem.

Materiałami wiskoelastycznymi są też pokrywające taśmy klejące i rozmaite naklejki warstwy adhezyjne, wykonane na ogół z pochodnych kwasu akrylowego ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{COOH}$ ). Choć pod względem zakresu kinetycznej kontroli przyczepności ustępują one znacząco elastomerom, takim jak PDMS, wybór odpowiedniej prędkości odklejanie ich z powierzchni przedmiotów, na których nie są mile widzianymi gośćmi, może znacząco zredukować ilość zanieczyszczeń, które za sobą pozostawiają. Dlatego też gorąco zachęcam Was, Drogie Czytelniczki i niemniej Drodzy Czytelnicy, abyście stawiając następnym razem czoła nieznośnym etykietom z cenami lub kodami paskowymi, podeszli do kwestii ich usuwania w ściśle naukowy sposób. Wytyćcie wzrok i bacznie obserwujcie, jak w pierwszych chwilach delaminacji etykiety zachowuje się jej warstwa akrylowa, a następnie dobierzcie na tej podstawie prędkość odklejanie tak, by w trakcie trwania całego procesu żaden z fragmentów owej warstwy nie uległ rozerwaniu. Niektóre z nich mogą „trzymać się” powierzchni przedmiotu bardziej zdecydowanie od pozostałych. Widząc, że z takim przypadkiem macie właśnie do czynienia, zmniejszcie na moment tempo odklejanie etykiety i poczekajcie, aż siły spójności wezmą górę nad siłami adhezji, a kłopotliwy fragment warstwy akrylowej oddzieli się od kolejnego ułamka milimetra kwadratowego podłoża. Postępując w ten sposób, na pewno zwiększycie liczbę uwieńczonych sukcesem potyczek, przegrywając jedynie z wiekowymi naklejkami o zdegradowanych chemicznie warstwach adhezyjnych, z którymi rozstać można się wyłącznie za pomocą brutalnych metod, o jakich w kilku słowach wspomniano na początku niniejszego artykułu.

#### Dla ciekawych szczegółów:

- [1] K.S. Novoselov et al., *Science* **306**, 666 (2004).
- [2] A.K. Geim, K.S. Novoselov, *Nat. Mater.* **6**, 183 (2007).
- [3] A.K. Geim, I.V. Grigorieva, *Nature* **499**, 419 (2013).
- [4] M.A. Meitl et al., *Nat. Mater.* **5**, 33 (2006).
- [5] L.A. Ponomarenko et al., *Nature* **497**, 594 (2013).
- [6] C.R. Dean et al., *Nature* **497**, 598 (2013).