



## Przełomowe odkrycia i koncepcje po II wojnie światowej

# Syntetyczne materiały węglowe

Kolejne przełomy cywilizacyjne były i są w znacznym stopniu owocem innowacji w dziedzinie technologii materiałowych. W ostatnich dekadach szereg istotnych innowacji zawdzięczamy otrzymaniu i zastosowaniu materiałów zbudowanych wyłącznie z atomów węgla. Dzięki temu można było, z jednej strony, wykorzystać wytrzymałość mechaniczną wiązań C-C, największą ze znanych w przyrodzie, a z drugiej – wytworzyć materiały o najwyższej wśród wszystkich znanych materiałów efektywnej przewodności elektrycznej.

Jedna grupa materiałów węglowych wywodzi się z diamentu, w którym występuje przestrzenna sieć wiązań C-C. Dzięki temu diament jest najtwardszym materiałem na Ziemi. Jego twardość wykorzystuje się przede wszystkim do cięcia i szlifowania różnych materiałów. Diamenty stosowane do tych celów są głównie pochodzenia kopalnego, ale już diamentopodobne warstwy na różnych podłożach otrzymuje się syntetycznie.

Mimo, że diament jest fazą trwałą dopiero pod bardzo wysokim ciśnieniem – okazało się, że powstaje on także podczas krystalizacji z fazy gazowej, np. wykorzystującej zimną plazmę. W otrzymanych z fazy gazowej amorficznych lub parakrystalicznych warstwach dominują tetraedryczne zespoły koordynacyjne atomów węgla powstałe wskutek hybrydyzacji  $sp^3$ , a więc takie, z jakich zbudowany jest diament. Dzięki temu warstwy wykazują wiele własności diamentu, szczególnie twardość i odporność na zużycie, przezroczystość, a także – przy małych stężeniach zanieczyszczeń – bardzo dobre przewodnictwo cieplne.

Inna grupa materiałów węglowych wywodzi się z drugiej odmiany alotropowej węgla, tj. grafitu, gdzie wiązania wywołane przez hybrydyzację  $sp^2$  orbitali atomów węgla powodują powstanie tzw. grafenów – płaskich warstw gęsto heksagonalnie ułożonych atomów węgla. Pozostały, trzeci orbital ( $2p$ ) centralnego atomu węgla w zespole koordynacyjnym jest skierowany prostopadle do płaszczyzny warstw i tworzy z orbitalem  $2p$  sąsiedniego grafenu słabe wiązanie  $\pi$ . Przeskoki słabo związanych elektronów wiązań  $\pi$  z pozycji do pozycji wywołują znaczną przewodność elektryczną i cieplną w płaszczyźnie grafenów. Nakładając się na siebie, grafeny tworzą pakiety, typowe dla struktury grafitu. W odróżnieniu od diamentu, naturalny grafit łuszczy się i jest łatwo odkształcalny, a to wskutek słabych wiązań  $\pi$  między grafenami w ich pakietach. Niemniej, w płaszczyźnie równoległej do warstwy grafenów, podatność na odkształcenie jest znikomo mała i porównywalna ze sztywnością diamentu. Z substancji zawierających pakiety grafenów można więc wytworzyć sztywne i wytrzymałe

materiały, jeśli zewnętrzne obciążenie działa równoległe do płaszczyzny warstw tych pakietów.

W pewnym stopniu udało się to osiągnąć w przypadku włókien węglowych, gdzie występują wstęgi nanometrycznych krystalitów zbudowanych z pakietów grafenów, prawie równoległe do osi włókien. Wytrzymałość mechaniczna włókien jest porównywalna z konstrukcyjnymi stopami metalicznymi, jeżeli nie lepsza.

Lekkie kompozyty o osnowie polimerowej, wzmocnione włóknami węglowymi, mają dzięki temu unikalne własności mechaniczne. Przykładowo, z kompozytów takich wykonano gros elementów konstrukcji oddanego ostatnio do eksploatacji samolotu Boeing *Dreamliner*, od wielu lat wytwarza się tyczki, wędziska oraz endoprotezy stawu biodrowego i sprężyste protezy nóg. Przy odpowiedniej modyfikacji struktury (co pozwala zwiększyć wydłużenie włókien przy zniszczeniu) włókna węglowe zostały swego czasu zastosowane jako dobrze tolerowane przez żywy organizm biomateriał (tj. materiał, który – wszczepiony do żywego organizmu – leczy, wzmacnia lub zastępuje jego tkanki, względnie poprawia ich funkcjonowanie).

Choć wysoką wytrzymałość wiązań C-C można jeszcze lepiej wykorzystać u wyizolowanych grafenów, to zastosowania grafenów i nanorurek węglowych, powstających wskutek tendencji grafenów do zwijania się, wynikają głównie z powodu ich efektywnej przewodności elektrycznej, najwyższej wśród wszystkich znanych materiałów. Do aktualnych i potencjalnych zastosowań tych materiałów należą ścieżki dla elektronów w tranzystorach polowych, a także panele miniaturowych lamp elektropromieniowych wysokiej świetlistości (np. dla ekranów telewizorów albo lamp oświetlających stadiony).

Ze struktury grafitu wywodzą się też pianki węglowe. Przy wspólnym dla wszystkich pianek niskim ciężarze i względnie wysokiej wytrzymałości, uporządkowanie struktury pakietów grafenów w ściankach pianek węglowych wywołuje tu nie niską – jak u innych pianek – lecz wysoką przewodność cieplną. Pozwala to przewidywać zastosowanie pianek węglowych do odprowadzania ciepła i chłodzenia urządzeń elektroniki dużej mocy, jako osłon przed przenikaniem promieniowania elektromagnetycznego lub do wzmocnienia osnów polimerowych kompozytów.

Warto dodać, że w takich dziedzinach, jak synteza diamentu z fazy gazowej czy włókna węglowe dla celów medycznych, badacze polscy odegrali – przyznawaną powszechnie w literaturze – pionierską rolę.

ROMAN PAMPUCH