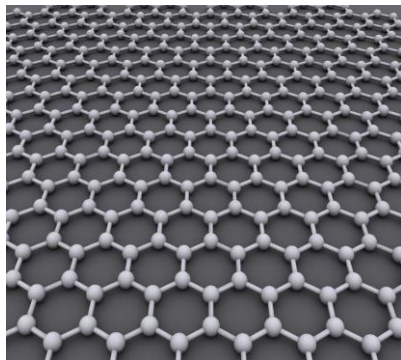


Apliko de grafeno en tekstilaj vestaĵoj*

Károly Lázár

lazarky2@gmail.com

Ŝlosilvortoj: Grafeno, Produktado de grafeno, Ecoj de grafeno, Aplikaĵoj de grafeno en tekstiloj



Figuro 1

Grafeno estas tavolo konsistanta el karbonatomoj ligitaj en mielĉelara strukturo, havanta dikecon de nur unu atomo, tio estas 0,3–0,4 nm, kaj arean densecon de 0,7–0,8 mg/m². Ĝi estas videbla nur per skana elektronmikroskopo (Figuro 1). Pro sia eksterordinara maldikeco

kaj sekva travidebleco, sia bonega elektra konduktivito, termika konduktivito, granda forteco (pli granda ol tiu de ŝtalo), fleksebleco, eluziĝorezisto kaj gaspermeablo, ĝi ebligas multflankan aplikadon.

La historio de ĝia esplorado reiras al 1959. La esprimon „grafeno” kreis *Hanns-Peter Boehm*, kiu en 1962 priskribis unu-tavolajn karbonfoliojn. La intereso pri grafeno multe kreskis post kiam *Novoselov* kaj *Geim* en 2004 raportis pri la nekutimaj elektronikaj ecoj de unu tavolo de grafitkristalreto.

Oni distingas inter unu-tavola kaj plurtavola grafeno, kaj grafeno kun pli ol 10 tavoloj – ĉi-lasta nomiĝas grafito. (Laŭ la normo ISO/TS 80004-13:2024, nur ĝis 10 karbontavoloj povas esti nomataj *grafeno*, super tio la ĝusta nomo estas *grafito*.) Kvankam la strukturo de grafeno kun diversaj tavoloj estas la sama, la nombro de tavoloj kondukas al malsamaj ecoj.

Produktado de grafeno

Grafeno estas produktata el grafito. Grafito troviĝas ankaŭ en la naturo, el karboŝtonaj sedimentoj, per komuna efiko de premo kaj temperaturo, sed estiĝas ankaŭ pro kontaktmetamorfozo. Artefarite ĝi ankaŭ produktblas el karbonhavaj materialoj, ekzemple el petrolkoksao aŭ karbontaropiĉo, per traktado per alta temperaturo, kiu grafitigas la karbonon, kaj eĉ – utiligante la karbonatomojn de la celulozo, kiu ilin konsistigas – el plantoj, arbara rubo, kaj eĉ ekzemple el bambuo. Ĉi-kaze la planto unue estas submetata al pirolizo (hejtado en oksigenmanka aŭ oksigenmankega medio). Ĉi tiu proceso malkomponas la organikajn kombinaĵojn en la bambuo kaj postlasas karbonriĉan restaĵon. Rezulte estiĝas aktiva karbono, el kiu per kemiaj oksidaj procesoj oni produktas grafen-oksidojn (GO), kiu enkondukas oksigenhavajn funkciajn grupojn en la karbonan strukturon. La grafen-oksido tiam estas reduktata per kemiaj, termikaj aŭ elektrokemiaj metodoj (rGO), por forigi la oksigenhavajn grupojn, kaj tiel estiĝas grafeno. [1, 2]

Grafenon artefarite unue produktis en 2004 A. *Geim* kaj K. S. *Novoselov*, fizikistoj de la Universitato de Manĉestro, kiuj pro tio ricevis la Nobel-premion pri fiziko en 2010. Per speciala glubendo ili forigis tavolojn de

grafitbloko ĝis ili sukcesis apartigi unu-atoman tavolon de ĝi. [3]

Krom ĉi tiu mekanika proceduro, en la postaj jaroj oni evoluigis aliajn procedurojn.

Kemia vapordeponado (Chemical Vapor Deposition, CVD) estas unu el la plej vaste uzataj metodoj por produkti grandajn kvantojn da bonkvalita grafeno. Dum tio, substrato (kutime kuprofolio) estas varmigata, kaj poste eksponata al karbonenhava gaso (ekzemple metano). La karbonatomoj deponiĝas sur la substrato kaj formas maldikan grafentavolon. Ĉi tiu metodo ebligas la produktadon de grandaj, koheraj grafenfolioj. [4]

Likva-faza eksfoliado ((Liquid-Phase Exfoliation, LPE)) signifas disigi grafiton en likva solvanto, kaj poste apliki teknikojn kiel la uzon de sonondoj (sonikado) por apartigi la grafentavolojn. Tiu metodo uzas ultrasonondojn, kiuj kreas kavitacion en la likvaĵo enhavanta la grafiton. La fortoj kreitaj de la kolapsantaj kavitaciaj bobeloj helpas apartigi la grafitavolojn. La LPE-metodo estas taŭga por la grandskala produktado de grafeno. Kompare kun CVD, LPE estas pli kostefika kaj uzebla por produkti grafenon en diversaj solvantoj, kio certigas flekseblecon en la plua prilaborado. [5]

Grafita oksigenredukto (Graphite Oxide Reduction, GOR) signifas oksigenadon de grafito por produkti grafitoksidon, kiu tiam povas esti eksfoliata en grafenoksidon tavolojn. La grafenoksido tiam estas reduktita kemie aŭ termike por produkti grafenon. Grafitoksidon redukto estas plurpaŝa proceso kiu inkludas oksigenadon de grafito al grafitoksido, tiam forigante la oksigenajn funkciajn grupojn. Ĝi estas relative malmultekosta metodo, sed ĝi povas enkonduki difektojn en la grafenan strukturon. [6]

La subita, per elektra kurento produktita hejtado (Flash Joule Heating) estas relative nova metodo, kiu uzas rapidan, alt-temperaturan elektran kurenton sur la karbonhavaj materialoj. La diversaj karbonfontoj rapide transformeblas al grafeno per tiu metodo, kiu havas grandan estontecon en la grandskala grafenproduktado. [7]

Apliko de grafeno al tekstilaĵo

Grafeno povas esti aplikata al tekstilaĵo plurmaniere:

- *Tremrado* – Tio estas farita per mergado de la ŝtofo en solvaĵon aŭ disvastigon enhavantan grafenoksidon kaj premado de la troa likvaĵo inter rulpremoj. La grafenoksidaj folioj povas rapide disigi en la fibrojn de la ŝtofo kaj estas deponitaj sur la fibrsurfaco per hidrogenligado. Poste, redukto estas farita per varmotraktado. Ĝi estas relative simpla kaj vaste uzata procezo. [8]

- *Ŝprucado* – La suspensiaĵo enhavanta grafenoksidon estas ŝprucita sur la surfacon de la ŝtofo, kreante unuforman tegajaĵon, kaj tiam redukto estas farita per varmotraktado. Ĝi estas plejparte uzata por malpezaj ŝtofoj. [9]

- *Presado* – La inko enhavanta grafenon povas esti presita sur la ŝtofon per filmopresaj aŭ inkŝprucigaj (ink-jet) teknikoj, ebligante precizajn padronojn kaj funkciajn aplikaĵojn en la kazo de inteligentaj tekstilaĵoj. [10]

* Ĉi tiu eldonajo estas traduko de artikolo publikigita en la hungara tekstila periodaĵo *Magyar Textiltechnika*, vidu ĉi tie: http://www.lazarky.hu/08pub/33_Grafen.pdf

- **Fibroproduktado** – En la kazo de artefaritaj fibroj, la grafeno estas miksitaj en la polimersolvajon formantan la fibrojn, aŭ en la kazo de fanditaj polimeroj, ĝi estas miksitaj en ĉi tiun, kaj tiel la materialo jam enhavas la grafenon en la fibroformado kaj la postan varmotraktadon. Tiu ĉi proceduro certigas, ke la grafeno estas enigita en la fibrostrukturon, plibonigante ĝiajn mekanikajn kaj funkciajn ecojn. En alia metodo, la grafen-entenanta antaŭaĵo estas miksitaj kun likvaj monomeroj, kaj tiam la miksaĵo estas polimerigita surloke (sur la loko). [11]

- **Tegado** – Ĉi tio inkluzivas metodojn kiel kemia vaporo-faza deponado (CVD), kiu ebligas apliki grafenajn tavolojn al teksaĵoj. Ĉi tiuj metodoj estas pli kompleksaj, sed rezultigas tegaĵojn de alta kvalito kun bonega adhero. [12]

- **Integrigo de grafenaj flokoj**. – Ĉi tio rilatas al la enkapsuligo de individuaj fadenoj kun grafenaj flokoj, kreante elektran konduktaĵon sur ili. La metodo ne postulas ligilon aŭ gluon por enkorpigi la grafenajn flokojn en la tekstilan materialon. La celo estas atingi elektran konduktivon de la ŝtofo. [12]

- **Elektroforezo** – Ĉi tiu proceduro uzas elektran kampon por fiksi grafenon al la surfaco de la tekstilaĵo. Ĝi estas konsiderata unu el la plej efikaj teknikoj por deponi maldikan tavolojn de grafena oksido sur la deziratan surfacon. Ĝi estis vaste uzata por deponi grafenajn oksidajn maldikajn filmojn sur diversaj substratoj, konservante la fizikajn ecojn de la tekstila materialo. [13]

Gravaj ecoj de grafeno por tekstilaĵoj

Pro siaj elstaraj ecoj, grafeno povas esti utila en multaj industriaj kampoj. Ĉi tie ni reliefigas nur tiujn, kiuj estas gravaj por la efiko al la ecoj de tekstilaĵoj.

Mekanikaj propretoj

Grafeno estas unu el la plej fortaj materialoj, pli forta ol ŝtalo kiam komparite laŭ la sama dikeco. Ĝia tensileto estas 125-130 GPa, kiu estas multe pli alta ol tiu de konstrukciŝtalo, kiu estas ĉirkaŭ 0.8 GPa, kaj tiu de aramido, kiu estas 0.4 GPa.

Grafeno havas la plej grandan surfacon areon por pezo de iu materialo: ununura dudimensia grafena folio havas specifan surfacon areon de 2630 m²/g.

Grafenaj folioj estas flekseblaj (kun Young's-modulo de 1020 GPa), bukligiblaj, kaj etendebaj (etendebaj ĝis 20% de sia origina grandeco sen rompo).

La malgrandaj geometriaj poroj en ĝia fizika strukturo, same kiel ĝia maldikeco, igas ĝin ekstreme akvrezista kaj taŭga por filtrado de ajna gaso, jona salo kaj acido. [14, 21]

Elektra konduktivito

Grafeno havas esceptan elektran konduktivon, signife pli altan ol tiu de metaloj. Ĝia elektronmoviĝebla estas 200 000–250 000 cm²·V⁻¹·s⁻¹, kompare kun tiu de bonaj konduktaj metaloj (aluminio, oro, arĝento, kupro), kiu estas 10–50 cm²·V⁻¹·s⁻¹. Ĝia specifa elektra rezistivo estas 31 Ω·m. [14, 21]

Termika konduktivito

Grafeno havas unu el la plej bonaj termikaj konduktivkapabloj de iu konata materialo. Ĝia tipa valoro estas 2000–5000 W·m⁻¹·K⁻¹ por libere pendigitaj specimenoj. Kompare, la termika konduktivito de kupro estas 401 W·m⁻¹·K⁻¹, kaj tiu de arĝento estas 429 W·m⁻¹·K⁻¹. [14, 15]

Kontraŭbakteriaj ecoj

Grafena oksido kapablas malhelpi bakteriojn aliĝi al la tekstilaĵo, kaj reduktita grafena oksido interagas rekte kun bakterioj. Ĝi fizike interrompas la ĉelmembranon de la bakterioj, kaŭzante elfluon de ĉelenhavo, malhelpante ilian metabolon kaj fine kaŭzante la disrompon de la ĉeloj. Tiel, grafeno malhelpas la kreskon kaj reproduktadon de bakterioj. Grafeno ankaŭ havas kontraŭvirusajn kaj kontraŭfungajn ecojn. [16]

UV-protekto

La proksime pakita aranĝo de karbonatomoj en sesangula krado ankaŭ kreas protektan baron kontraŭ ultraviolaj radioj. [17]

Akvomalkapablo

Dum unula tavolo grafeno estas hidrofila, multtavola grafeno kaj grafenoksido posedas hidrofobajn ecojn. La hidrofoban naturon de grafeno povas influi la nombro de tavoloj kaj la ĉeesto de funkciaj grupoj sur ĝia surfaco. [18]

Optikaj ecoj

Por sunĉeloj necesas materialoj, kiuj estas konduktaj kaj trapasigas lumon. Ununura tavolo da grafeno havas optikan transsendecon de 97,7%, kio faras ĝin tre travidebla. Tamen, ĝi ne estas tre bona por kolekti la elektran kurenton generitan en la sunĉelo. Por tio pli bona povas esti grafenoksido (GO), kiu estas malpli kondukta, sed pli travidebla kaj pli bona ŝargokolektanto. [13, 19]

Kemiaj propretoj

Grafeno povas esti funkciigita kun diversaj kemiaj grupoj, kio povas rezultigi diversajn materialojn, kiel ekzemple grafenoksidon (funkciigita per oksigeno kaj heliumo) aŭ fluoritan grafenon (funkciigita per fluoro). [13]

La aplikado de grafeno en tekstilaj vestaĵoj

Pro la elstaraj propretoj de grafeno, ĝi estas utiligita en multaj industriaj kampoj. Ĝi aperis ankaŭ en tekstilaĵoj, precipe en vestaĵoj. [20]

Grafeno faras grandajn servojn en **intelligentaj vestaĵoj**. Pro ĝia fleksebleco kaj elstara kondukteblo, ĝi ebligas enmeton de sensiloj kaj elektronikaj elementoj en la ŝtofon. Ĉi tiu metodo de integriĝo de grafenaj floketoj en la profunda strukturo de la ŝtofo – kompare kun metaloj – certigas molajn, fleksajn, kaj komfortajn vestajn propretojn. La fakto, ke grafeno ankaŭ povas ludi rolon en la fabrikado de sunpaneloj, povas ebligi la integriĝon de sunpaneloj en intelligentajn vestaĵojn, kiuj povas anstataŭi aliajn energifontojn (kiel bateriojn). Elektrike konduktaj grafenaj surfacoj aplikitaj per presado restas konduktaj eĉ sub pli altaj ŝarĝoj. Esploroj montras, ke ili restas perfekte funkciantaj tra ĝis 1000 cikloj kaj kun ŝarĝoj de 20–50%, kio korespondas al kutimaj portadaj kondiĉoj. Ĉi tio estas perfekte utiligebla, ekzemple, en aparatoj enmetitaj en vestaĵojn por kontinua monitorado de korpa funkciado.

Tekstilaĵoj impregnataj per grafeno **tre bone rezistas al mediaj faktoroj** (kiel akvo, kemiaĵoj kaj UV-radiado). Ĉi tio kongruas kun la postuloj por ekologiaj kaj daŭrigeblaj tekstilindustriaj solvoj, ĉar ĝi malnecesigas la kutimajn traktadojn per kemiaĵoj destinitaj por ĉi tiuj celoj.

Tekstilaĵoj kovritaj per grafeno kun elstara varmokondukta kapablo povas ankaŭ provizi **temperaturkontrolojn** dum fizikaj agadoj. Sportaj kaj



Sportĉemizo kun grafena tegajo. La interna surfaco de la ŝtofo estas kovrita per grafentavolo aplikita per presado. [20]

vintraj vestoj faritaj el tekstilaĵoj enhavantaj grafenon, kiel bateriaj varmigataj jakoj, gantoj, pantalonoj, ĉemizoj kaj ŝtrumpoj, montriĝas efikaj danke al la elstaraj varmokondukta kaj varmokonserva proprecoj de grafeno.

Grafeno ankaŭ povas esti uzata kiel **elektronika temperaturmezurilo**, kiu povas helpi detekti certajn specojn de tumoroj, cirkuladajn problemojn, aŭ muskolajn problemojn.

Inteligentaj tekstilaĵoj kun grafeno ludas esencan rolon en **sanaplikoj**, ek-zemple por

fora monitorado de pacien-toj (kun realtempa observado de fiziolo-giaj signaloj) kaj uzablaj terapiaj aparatoj.

Grafeno havas antibakterian efikon, kiu baziĝas sur ĝia kapablo detrui la membranon de bakterioj. Tio igas ĝin taŭga por la produktado de **protektaj vestaĵoj**, kiuj protektas la portanton kontraŭ bakteriaj infektoj. Pro sia granda mekanika forto, eluziĝ-rezisto kaj akvorezisto, grafeno estas ideala por evoluigi diversajn protektajn vestaĵojn (fajrobrigadistaj kostumoj, vestaĵoj rezistantaj al kemiaĵoj, kaj kirasaj jakoj). En certaj fakaj kampoj, la kontraŭstataj proprecoj de grafeno estas ankaŭ grava avantaĝo. Kiel intereson, oni mencias eksperimentojn pri la evoluigo de grafen-enhavanta sporta ĉemizo por boksistoj, kiu protektas kontraŭ internaj organaj vundoj kaŭzitaĵoj de batado dum trejnado.

En **subvestaĵoj**, la antibakteriaj kaj kontraŭstataj ecoj de grafeno estas utilaj. Plia avantaĝo – aparte grava en ĉi tiu kampo – estas, ke grafeno estas hipoalergia, tio signifas, ke ĝi ne kaŭzas alergiajn reagojn ĉe la portanto.

En **supra vestaĵaro**, la termoregula, akvoresista eco kaj granda forto de grafeno estas avantaĝo. Akvoresista kapablo povas esti atingita per ŝprucado de grafeno disigita en akvo.

En **matracoj** kaj **litaĵoj**, la kontraŭstataj kaj termoregaj ecoj de grafeno povas proponi signifajn avantaĝojn.

Koncerne la **prizorgon de grafeno-enhavaj vestaĵoj**, oni devas konsideri, ke ili rekomendas esti lavitaj en malvarma akvo kun milda lavprodukto, evitante blankigilon kaj moligilon. Ili devas esti sekigitaj en libera aero aŭ ĉe nur ne tro alta temperaturo. Ili povas esti gladigitaj per varmotaĵo.

Uzita literaturo

- [1] Diego Voccia, Lucrezia Lamastra: Unpacking the Carbon Balance: Biochar Production from Forest Residues and Its Impact on Sustainability
<https://www.mdpi.com/1996-1073/17/18/4582>
- [2] Febi Indah Fajarwati et al.: Synthesis and transformation of graphene-like structures from bamboo waste for photoelectrochemical devices
<https://doaj.org/article/bd062335a40e4448a95de03ab30a8393>
- [3] Grafén. Hungara Vikipedio.
<https://hu.wikipedia.org/wiki/Graf%C3%A9n>
- [4] Les Johnson, Joseph E. Meany: Mass-Producing Graphene.
<https://www.americanscientist.org/article/mass-producing-graphene>
- [5] Yanyan Xu et al.: Liquid-Phase Exfoliation of Graphene: An Overview on Exfoliation Media, Techniques, and Challenges.
<https://www.mdpi.com/2079-4991/8/11/942>
- [6] Stephen Wakeland et al.: Production of graphene from graphite oxide using urea as expansion-reduction agent
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622310003805>
- [7] Xinyuan Liu, Hongchao Luo: Preparation of Coal-Based Graphene by Flash Joule Heating.
<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsomega.3c07438>
- [8] Yang Liu et al.: Functionalization of Fabrics with Graphene-Based Coatings: Mechanisms, Approaches, and Functions.
https://www.researchgate.net/publication/373861025_Functionalization_of_Fabrics_with_Graphene-Based_Coatings_Mechanisms_Approaches_and_Functions
- [9] Archana Samanta, Romain Bordes: Conductive textiles prepared by spray coating of water-based graphene dispersions.
https://www.researchgate.net/publication/338551987_Conductive_textiles_prepared_by_spray_coating_of_water-based_graphene_dispersions
- [10] Nazmul Karim et al.: All inkjet-printed graphene-based conductive patterns for wearable e-textile applications.
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2017/tc/c7tc03669h>
- [11] Xuqiang Ji et al.: Review of functionalization, structure and properties of graphene/polymer composite fibers.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X16300793>
- [12] Materials of the future: Graphene and textiles.
<https://graphene-flagship.eu/materials/news/materials-of-the-future-graphene-and-textiles/>
- [13] Yifei Ma et al.: Electrophoretic deposition of graphene-based materials: A review of materials and their applications.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352847818300091>
- [14] Dr Robabeh (Zohreh) Gharae et al. (WTiN): Graphene & its opportunities for the textile industry
https://www.wtin.com/media/11453925/graphene-and-its-opportunities-for-textile-industry_wtin_2018.pdf
- [15] Hóvetési tényező. Wikipédia szócikk.
https://hu.wikipedia.org/wiki/H%C5%91vezet%C3%A9s_t%C3%A9nyez%C5%91
- [16] Yinfeng Li, Hongyan Yuan et al.: Graphene microsheets enter cells through spontaneous membrane penetration at edge asperities and corner sites
<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1222276110>
- [17] João Henrique Barcha Lupino et al.: UV-protective compound-containing smart textiles: A brief overview
<https://www.redalyc.org/journal/429/42976206001/html/>
- [18] Is Graphene Hydrophilic or Hydrophobic?
<https://www.msesupplies.com/blogs/news/is-graphene-hydrophilic-or-hydrophobic>
- [19] Graphene Solar: Introduction and Market News.
<https://www.graphene-info.com/graphene-solar-panels>
- [20] Graphene Wear
<https://graphene-wear.com/garments>
- [21] Graphen. Germana Vikipedio.
<https://de.wikipedia.org/wiki/Graphen>