Analýza recyklácie kompozitných materiálov v odvetví elektroniky
(Letný hackathon 2024)

1. Úvod

Oblasť spotrebnej elektroniky je dynamicky rastúci globálny trh s významným dopadom na životné prostredie. V roku 2022 sa podľa OSN vyprodukovalo rekordných 62 miliónov ton elektronického odpadu, čo je o 82 % viac ako v roku 2010. Do roku 2030 sa očakáva nárast na 82 miliónov ton.

V roku 2022 bolo oficiálne vykázaných iba 22,9 ton kompozitných obalov z celkových 10 593 124,3 ton odpadov. Veľká časť kompozitných obalov pravdepodobne končí v zmesovom komunálnom odpade, ktorý tvoril 9,4 % všetkých obalov.

2. Kompozitné materiály oblasti balenia elektroniky

Ako obaly pre elektroniku sa najčastejšie používajú krabice z vlnitej lepenky (minimálne 5-vrstvové), polystyrénové a penové preložky, vzduchové vankúšiky, penová výplň Flo-pak, antistatické obaly, PE fixácie a Quick-Pack. Tieto obaly sa dajú ručne oddeliť a nie sú považované za kompozity. Zamerali sme sa na nanokompozitné materiály v moderných technológiách obalov pre elektroniku, ktoré môžu byť biodegradovateľné a rozložiteľné na CO_2, metán, vodu, anorganické zlúčeniny a biomasu.

Obaly na elektroniku vyžadujú špecifické vlastnosti, ktoré dosahujú kompozitné materiály kombináciou rôznych zložiek spojených matricou (kovovou, uhlíkovou, polymérnou alebo keramickou).

Kovové kompozitné obaly sú využívané vo vojenskej a leteckej technike pre pevnosť a vodivosť. Výstuže môžu byť z rôznych vlákien (sklené, polymérne, čadičové, proteínové, borové, keramické), a podľa ich veľkosti sa kompozity delia na nano-, mikro- a makrokompozity.

Uhlíkové nanotrubice (CNTs) sú často kombinované s hliníkovým nitridom (AlN) pre lepšie tepelné a mechanické vlastnosti. Polymérne nanokompozity zlepšujú vlastnosti obalov ako priepustnosť kyslíka, bariérové vlastnosti, tepelná stabilita a mechanická odolnosť. Tepelne riadiace fólie s grafénom chránia citlivé komponenty.

Ohňovzdorné obaly sú dôležité pre citlivú elektroniku, čo zabezpečuje pridanie montmorillonitu (MMT) alebo hydroxidu hlinitého. Nanokompozity s oxidom zinočnatým (ZnO) alebo oxidom titaničitým (TiO_2) chránia produkty pred UV žiarením.

3. Spôsoby nakladania s kompozitnými obalmi a ich recyklácia

Analýza trhu ukázala, že kompozitné obaly sa v elektronike používajú najmä na balenie citlivých komponentov a ku spotrebiteľom sa dostávajú minimálne. Väčšina týchto obalov končí v priemyselnom prostredí, kde sa využívajú na transport a stávajú sa odpadom. Dáta o typoch a množstve kompozitných obalov sa na Slovensku evidujú od roku 2023 so zavedením ekomodulácie, ktorá výrobcov zaväzuje informovať o materiálovom zložení obalov kvôli prispôsobeniu poplatkov za zber a recykláciu. Presnejšie dáta budú dostupné až v roku 2025.

Recykláciou kompozitných obalov sa zaoberá nemecká firma Saperatec, ktorá vyvíja špecializované separačné kvapaliny schopné oddeliť vrstvy kompozitných materiálov. Proces zahŕňa zmenšenie veľkosti materiálu, miešanie a zahrievanie, preosievanie a repasovanie kvapaliny. Patentovanú metódu oddeľovania viacvrstvových materiálov vyvinul Fraunhofer Institute for Process Engineering and Packaging IVV, ktorú využíva spoločnosť Unilever v Indonézii od roku 2018. Patentovaný proces CreaSolv® umožňuje postupne rozpúšťať cieľové polyméry zo zmiešaných plastov alebo kompozitov, pričom výsledkom sú vysokokvalitné regranuláty na výrobu nových obalových materiálov (12).

Medzi globálnych lídrov v recyklácii superzliatin patrí nemecká spoločnosť ELG. V USA sa výskumom a inováciami kompozitných materiálov zaoberá inštitút IACMI, v UK túto funkciu zastrešuje NCC.

4. Metódy recyklácie nanokompozitných obalov z elektroniky v literatúre a praxi

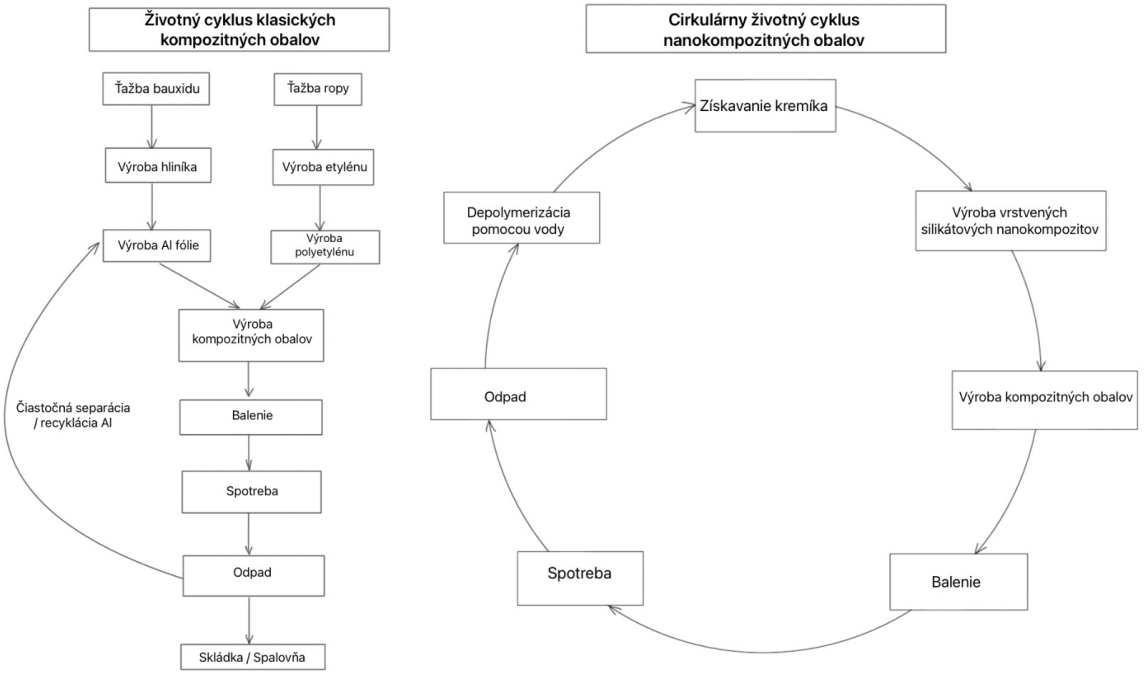
Kremík je prvkom, ktorý je v zemskej kôre zastúpený hojnejšie ako uhlík. Nanokompozity na báze kremíka môžu byť procesované rôznymi a dobre škálovateľnými výrobnými metódami používanými pri plastových materiáloch, ako je napríklad kompresné formovanie, termálne vstrekovanie do foriem, alebo aj 3D printing. V porovnaní s keramickými, plastovými materiálmi a sklom tieto nanokompozity vykazujú nižšiu teplotnú konduktivitu, termostabilitu a fungujú ako teplotne izolujúce materiály. Zároveň tieto nanokompozity vykazujú ľahkosť, tvrdosť a odolnosť obdobnú plastovým materiálom a môžu byť transparentné. Nanokompozity založené na kremíkovej matrici alebo obsahujúce kremíkové nanočastice sú zároveň podľa dostupnej literatúry recyklovateľné a kremík nepredstavuje záťaž pre životné prostredie. V niektorých prípadoch biokremíkových nanokompozitov sa jedná o úplne biodegradovateľné materiály. Toto všetko ponúka široké možnosti a aplikácie za súčasného zníženia plastového znečistenia, zníženia využívania fosílnych palív a vytvorenia uzavretej ekonomiky a životného cyklu týchto materiálov (13, 14, 15).

Nanokompozity na báze kremíka môžu byť degradované a recyklované za izbovej teploty a iba pomocou deionizovanej vody. Vďaka tomu je tento nanokompozit a jeho recyklácia veľmi atraktívnym a jeho životný cyklus značne cenovo efektívny, naznačujúci udržateľnosť pre priemyselné aplikácie bez sekundárneho environmentálneho znečistenia. Vodou indukovaná cirkulárna recyklácia umožňuje nanokompozitom na báze kremíka byť spracovávané a recyklované vo veľkej škále. Polymerizácia a depolymerizácia reverznej Si-O-Si siete s nanočasticami je založená na interakcii s H_2O a môže byť kontrolovaná zmenou hydrofobicity/hydrofility. Depolymerizácia sa vykonáva nalámaním kompozitu a tým obnažením hydrofilných častí kompozitu s následnou depolymerizáciou pomocou H_2O. Nalámaný materiál tak môže absorbovať H_2O a indukovať depolymeráciu za izbovej teploty (13).

Bionanokompozity môžu byť pripravené z prírodných biopolymérov, ako sú napríklad škroby (sacharidy) a proteíny. Môžu byť vytvorené pomocou interkalácie taveniny alebo metódy interkalácie rozpúšťadla. Začlenenie vrstevnatých silikátov do biopolymérnych matríc má za následok zlepšenie mechanických vlastností, odolnosti proti vodnej pare a tepelnej stability výsledných bionanokompozitov bez toho, aby došlo k zníženiu biologickej

rozložiteľnosti vďaka ich disperzii nanometrovej veľkosti. Bionanokompozity sú zmesou polymérov s nanoanorganickými alebo organickými plnivami s konkrétnou veľkosťou, geometriou a chemickými vlastnosťami povrchu. Bionanokompozit možno účinne biologicky rozložiť. Degradácia polyméru môže byť dôsledkom pôsobenia mikróbov, makroorganizmov, fotodegradácie alebo chemickej degradácie. Konečnými produktmi procesu degradácie sú CO_2, H_2O a biomasa za aeróbnych podmienok a uhľovodíky, ako metán a biomasa za anaeróbnych podmienok. Pri likvidácii a degradácii môžu byť tieto bionanokompozity po 3 mesiacoch, 6 mesiacoch alebo 12 mesiacoch úplne zdegradované a nespôsobujú žiadne poškodenie životného prostredia. Napríklad na konci svojej životnosti môžu byť tieto biologicky odbúrateľné materiály zavedené v poľnohospodárstve a bezpečne pochované v pôde pre konečné a úplné kompostovanie a naďalej majú pozitívnu funkciu pri poľnohospodárskej aplikácii počas cyklu plodín. Zdá sa teda, že nanokompozity a bionanokompozity na báze kremíka majú veľmi svetlú budúcnosť pre širokú škálu aplikácií (13, 15).
Ďalším recyklovateľným variantom využitia (bio)nanokompozitov na báze kremíka sú kompozity zložené z montmorillonitu a celulózových nanofibríl. Príprava prebieha disperziou montmorillového prášku, drviny do deionizovanej H_2O s následnou sonifikáciou a následnou disperziou do suspenzie celulózových nanofibríl. Recyklácia tohto typu kompozitu prebieha nastrihávaním materiálu s následným lúhovaním v H_2O po dobu 5 minút. Nasleduje uchovanie pri izbovej teplote po dobu 24 hodín a opätovným strihom materiálu. Potom je možné materiál opäť a znova tvarovať a tvoriť do filmu. Tento materiál vykazuje optickú transmitanciu, UV-shielding efekt, teplotné izolačné vlastnosti, teplotný shielding a aj žiaruvzdorné vlastnosti (14).

5. Ideálny životný cyklus kompozitných materiálov



Zoznam bibliografických odkazov

(1) "Global E-Waste Monitor 2024: Electronic Waste Rising Five Times Faster Than Documented E-Waste Recycling." UNITAR, dostupné online: https://www.unitar.org/about/news-stories/press/global-e-waste-monitor-2024-electronic-waste-rising-five-times-faster-documented-e-waste-recycling

(2) Tomášková, Tetjana. *Perspektivní kompozity pro elektrotechniku*. 2012.

(3) Janečková, Veronika. *Design sady obalů*. 2013.

(4) Lizundia, E., Ruiz-Rubio, L., Vilas, J., & León, L. (2016). "Poly(l-lactide)/zno nanocomposites as efficient UV-shielding coatings for packaging applications." *Journal of Applied Polymer Science, 133*. https://doi.org/10.1002/APP.42426

(5) Wan, Yan-Jun, et al. (2020). "Recent advances in polymer-based electronic packaging materials." *Composites Communications, 19*, 154-167.

(6) Kausar, A. (2020). "A review of high performance polymer nanocomposites for packaging applications in electronics and food industries." *Journal of Plastic Film & Sheeting, 36*(1), 94-112. https://doi.org/10.1177/8756087919849459

(7) Saperatec. "Saperatec Recycling Technology." dostupné online: https://saperatec.de/en/saperatec-2/

(8) Štatistický úrad SR (2024). *Odpady v Slovenskej republike za rok 2022*.

(9) Gao, Jie, et al. (2024). "Synergistic Effect of Aluminum Nitride and Carbon Nanotube-Reinforced Silicon Rubber Nanocomposites." *Molecules (Basel, Switzerland), 29*(12), 2864.

(10) Eurostat. "Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)." dostupné online: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_waseleeos/default/table?lang=en&category=env.env_was.env_wasst

(11) *Environmental Silicate Nano-Biocomposites*. United Kingdom: Springer London, Limited, 2012.

(12) Fraunhofer Institute for Process Engineering and Packaging IVV. "Packaging recycling in a closed-loop process." dostupné online: https://www.ivv.fraunhofer.de/en/recycling-environment/packaging-recycling.html

(13) Hou, Y., Zhu, G., Catt, S. O., Yin, Y., Xu, J., Blasco, E., & Zhao, N. (2023). "Closed-Loop Recyclable Silica-Based Nanocomposites with Multifunctional Properties and Versatile Processability." *Advanced Science, 10*(35), 2304147. https://doi.org/10.1002/advs.202304147

(14) Li, L., Maddalena, L., Nishiyama, Y., Carosio, F., Ogawa, Y., & Berglund, L. A. (2022). "Recyclable nanocomposites of well-dispersed 2D layered silicates in cellulose nanofibril (CNF) matrix." *Carbohydrate Polymers, 279*, 119004. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.119004

(15) Zhao, R., Torley, P., & Halley, P. J. (2008). "Emerging biodegradable materials: Starch- and protein-based bio-nanocomposites." *Journal of Materials Science, 43*(9), 3058–3071. https://doi.org/10.1007/s10853-007-2434-8