

Nanomateriály a ich využitie vo forenzných vedách

Nanomaterials and their use in forensic sciences

SOŇA MASNICOVÁ¹, MAGDALÉNA KRAJNÍKOVÁ²

Abstrakt

Článok poskytuje prehľad o pokrokoch v inovatívnych technológiách a materiáloch, akými sú nanotechnológie a nanomateriály, ako aj o ich využívaní vo forenznnej oblasti. Tento prehľad je zameraný na rôzne typy nanomateriálov, ktoré poskytuje súčasná materiálová veda, ich charakteristiku, vývoj a klasifikáciu. Predstavuje rôzne forenzné oblasti, v rámci ktorých bola aplikácia nanomateriálov a nanopolymérov vysoko prínosná. Okrem toho sa zameriava aj na aktuálne výzvy a perspektívy rozvoja nanotechnológií.

Kľúčové slová

nanomateriály, nanočastice, mikrofluidné zariadenia, laboratórium na čipe, forenzné vedy

Abstract

The article provides an overview of advances in innovative technologies and materials, such as nanotechnologies and nanomaterials, as well as their use in forensic area. This review is focused on the different types of nanomaterials provided by current materials science, their characteristic, development and classification. It represents various forensic areas in which the application of nanomaterials and nanoparticles has been highly beneficial. In addition, it also focuses on the current challenges and perspectives of the development of nanotechnologies.

Key words

nanomaterials, nanoparticles, microfluidic devices, lab-on-chip, forensic sciences

DOI

<http://dx.doi.org/10.37355/fvpk-2024/1-07>

Úvod

Oblasť výskumu materiálov výrazne pokročila vďaka vývoju nových polymérnych materiálov, medzi ktoré radíme aj nanomateriály. Nové materiály s pokročilými funkciami

1 Doc. RNDr. Soňa Masnicová, PhD., docent na Katedre kriminalistiky a forenzných vied, Akadémia Policajného zboru v Bratislave

2 JUDr. Magdaléna Krajníková, PhD., odborný asistent na Katedre kriminalistiky a forenzných vied, Akadémia Policajného zboru v Bratislave

a vlastnosťami sa osvedčili svojim širokým uplatnením v spoločnosti. Nanotechnológia využíva rôzne oblasti biológie, fyziky a chémie na syntézu, tvorbu, dizajn, manipuláciu a štúdium javov alebo látok na nanometrovom meradle (1–100 nm). Nanomateriály majú široké využitie v mnohých oblastiach, ako sú biomedicína, fyzika, veda o materiáloch, elektronické inžinierstvo atď.³

Zavedenie nanomateriálov a nanotechnológií do oblasti forenzných vied výrazne zlepšilo proces vyšetrovania, skrátilo čas potrebný na analýzu, zvýšilo presnosť, selektivitu a citlivosť. Pokročilé nanomateriály a polyméry sa využívajú v rôznych technikách a prístrojoch, ktoré pomáhajú analyzovať a detegovať stopy dôkazov alebo vzorky na nanoúrovni, ktorá bola predtým nedosiahnuteľná. Nové nanomateriály poskytujú nové riešenia na získavanie a detekciu stôp a dôkazov, ako sú DNA z odtlačkov prstov, ťažké kovy, stopy po výbuchu a streľbe. Syntéza nových nanomateriálov viedla k osobitým mechanickým, elektrickým, optickým, chemickým a magnetickým vlastnostiam. Nanočastice, uhlíkové nanotrubičky, kvantové bodky, supramolekuly, nanorúrky a nanovlákná sú významnými príkladmi nanomateriálov. Nanorozmery týchto materiálov poskytujú vysokú povrchovú plochu, ktorá prispieva k molekulárnym interakciám, pretože existuje vysoká dostupnosť aktívnych miest pre reakcie. Nanoprístroje získali význam aj vďaka vysokej selektivite a citlivosti. Nanočipy, nano-bio senzory a nanosondy sú výrazne využívané výskumníkmi v rôznych oblastiach, ako sú detekcia kovov, diagnostika ochorení a hybridizačné testy.^{4,5}

Forenzné aplikácie založené na nanopolyméroch a nanomateriáloch sa pohybujú od sledovania na nanoúrovni, detekcie drog, toxínov, jedov, nanosenzorov, technológie odtlačkov prstov, forenzných dokumentov, detekcie porúch a ochorení, až po technológiu DNA. V súčasnosti je už možné detegovať zaistené stopy na nanoúrovni pomocou rôznych mikroskopických, chromatografických a spektroskopických techník. Nové nanomateriály sa využívajú na zvýšenie efektívnosti týchto techník.

Nanomateriály – ich charakteristika, vývoj a klasifikácia

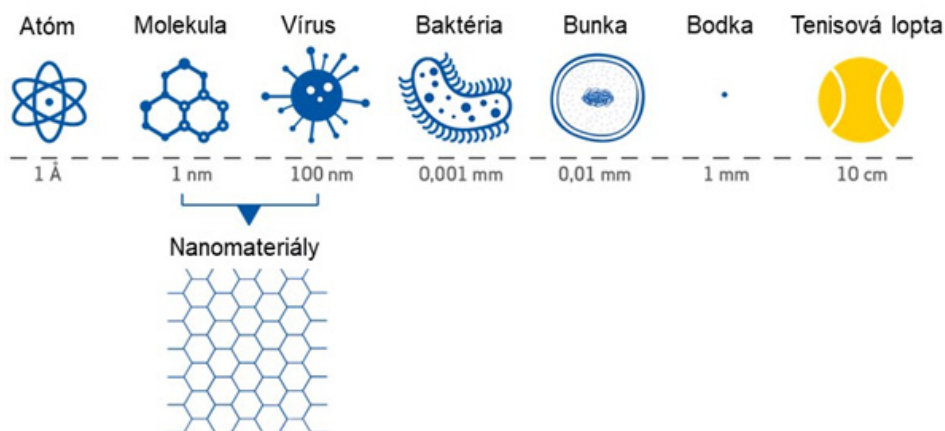
Za nanomateriály sú vo všeobecne považujú častice s veľkosťou približne od 1 do 100 nanometrov (nm) (Obr. 1). Avšak z hľadiska regulácie, veľkosť nie je jediným kritériom, ktorý sa zohľadňuje pri stanovovaní, či je materiál nanomateriálom. Existujú aj iné aspekty, ktoré treba brať do úvahy predtým, než je určitý materiál označený za "nanomateriál". Je to vyjadrené aj v nasledujúcich definíciách.⁶

3 CHEN, Y. F. 2011. *Forensic applications of nanotechnology*. In *Journal of the Chinese Chemical Society*, 58(6), p. 828-835.

4 SAMANTA, A., MEDINTZ, I. L. 2016. *Nanoparticles and DNA – a powerful and growing functional combination in bionanotechnology*. In *Nanoscale*, 8(17), p. 9037-9095.

5 LODHA, A. S., PANDYA, A., SHUKLA, R. K. 2016. *Nanotechnology: an applied and robust approach for forensic investigation*. In *Forensic Research & Criminology International Journal*, 2(1), p. 00044.

6 EUON - European Chemicals Agency. 2023b. *Nanomateriály*. <https://euon.echa.europa.eu/sk/general-information>



Obr. 1: Zaradenie nanomateriálov vzhľadom na veľkostnú škálu⁷

Medzinárodná organizácia pre normalizáciu definuje nanomateriály vo svojej norme ISO/TS 80004 nasledovne: „materiál spĺňajúci aspoň v jednej dimenzii podmienku nanomerítka alebo majúci vo svojej vnútornej štruktúre alebo na povrchu častice s veľkosťou v nanomerítke“, s nanomerítkom definovaným ako: „veľkosť v rozmedzí 1 až 100 nm“. Táto definícia zahŕňa tak nanoobjekty, ktoré sú samostatnými časticami materiálu, ako aj nanoštruktúrované materiály, ktoré majú vnútornú alebo povrchovú štruktúru v nanomerítke.⁸

Európska komisia prijala svoju vlastnú definíciu nanomateriálov, ktorá sa používa pri právnych predpisoch v rámci Európskej únie. Podľa tejto definície je nanomateriál : „prírodný, vedľajší alebo priemyselne vyrábaný materiál zložený z pevných častíc, ktoré sa vyskytujú samostatne alebo ako identifikovateľné základné častice v agregátoch alebo aglomerátoch, v prípade ktorého najmenej 50 % týchto častíc v zložení materiálu podľa veľkosti a počtu častíc spĺňa aspoň jednu z týchto podmienok: a) jeden alebo viac vonkajších rozmerov častice sa nachádza vo veľkostnom rozsahu od 1 nm do 100 nm; b) častica má podlhovastý tvar, ako napríklad tyčinka, vlákno alebo rúrka, pričom dva vonkajšie rozmery sú menšie ako 1 nm a ďalší rozmer je väčší ako 100 nm; c) častica má tvar doštičky, pričom jeden vonkajší rozmer je menší ako 1 nm a ostatné rozmery sú väčšie ako 100 nm.“⁹

Nanomateriály existovali v prírode už dávno predtým, ako si to vedci dokázali vôbec predstaviť. História vedy o nanotechnológii a nanomateriáloch je však relatívne krátka, keďže na spracovanie hmoty na takej malej úrovni bolo nutné skombinovať poznatky z

⁷ Tamtiež.

⁸ NANOTECHNOLOGIES - Plain language explanation of selected terms from the ISO/IEC 80004 series. 2017. Online Browsing Platform (OBP). Dostupné online, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:18401:ed-1:v1:en>

⁹ NANOMATERIÁL. 2022. EUR-lex: Odporúčanie Komisie z 10. júna 2022 týkajúce sa vymedzenia pojmu nanomateriál (2022/C 229/01), Dostupné online, [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0614\(01\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0614(01)&from=EN)

mnohých oblastí, ako sú fyzika, chémia, biológia a veda o materiáloch.

Ľudia používajú nanomateriály viac než 4 000 rokov bez toho, aby úplne pochopili ich vedecké pozadie. Množstvo ílovitých minerálov obsahuje prírodné nanomateriály, ktoré sa využívajú už tisícky rokov napríklad v stavebníctve, medicíne a umení. Nedávne vedecké analýzy preukázali, že farba na vlasy na báze olova používaná v starobyľom Egypte obsahovala syntetizované nanokryštály sulfidu olovnatého. Niektoré známe historické artefakty vďaka za svoje výnimočné vlastnosti nanomateriálom. Lykurgov pohár, sklenený pohár zo 4. storočia z Ríma, obsahuje zlaté a strieborné nanočastice, ktoré menia farbu podľa osvetlenia. Z okien s farebným sklom, ktoré sa nachádzajú v mnohých stredovekých kostoloch, svietia žiarivé farby vďaka nanomateriálom vnútri skla.

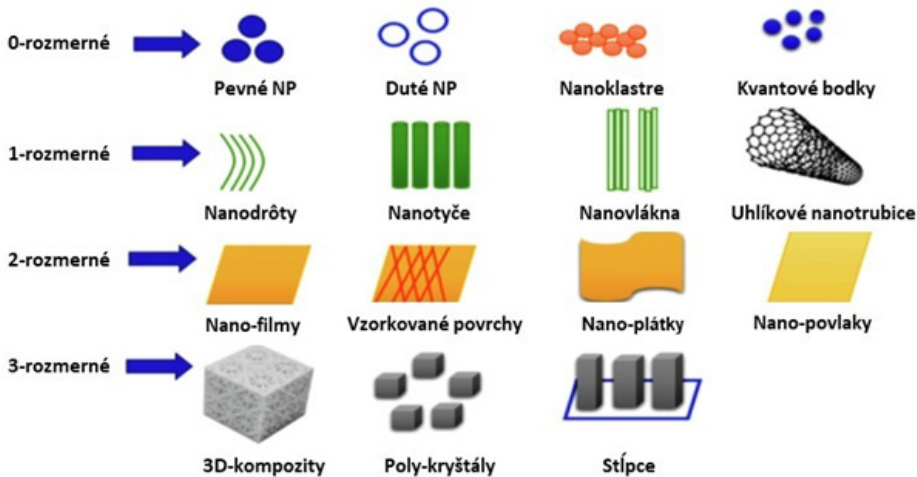
No prvé kroky k systematickému skúmaniu nanotechnológií prišli až v 20. storočí. V roku 1959 fyzik Richard Feynman predniesol prednášku s názvom „There's Plenty of Room at the Bottom“, kde navrhol myšlienku manipulácie s atómami a molekulami na nanometrovej úrovni. Tento koncept sa stal základom pre rozvoj nanotechnológií a nanovied. V osemdesiatych a deväťdesiatych rokoch 20. storočia výskum v oblasti nanotechnológií prudko pokročil. Výskumníci objavili nové nanomateriály, ako sú fullerény, nanotrúbice a kvantové bodky, ktoré vyvolali veľký záujem a posunuli nanotechnológiu ďalej.

Vývoj nanotechnológií a nanovied v súčasnosti rýchlo napreduje a dosahuje významný pokrok v mnohých smeroch. V oblasti materiálových vied boli objavené a vyvinuté nové nanomateriály s unikátnymi vlastnosťami. V oblasti elektroniky sa nanotechnológie využívajú na vývoj menších a výkonnejších zariadení. V nanomedicíne sa nanotechnológie podieľajú na vývoji diagnostických a terapeutických nástrojov. A čoraz širšie využitie nachádzajú v mnohých oblastiach každodenného života.¹⁰

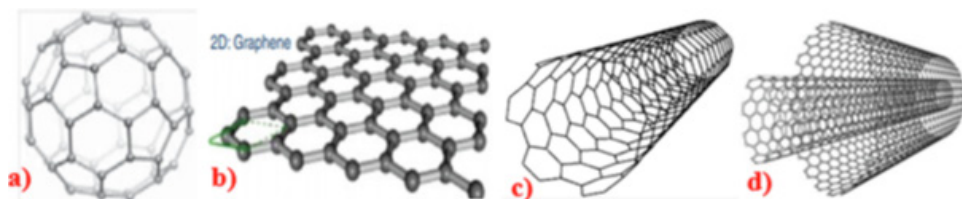
Nanomateriály môžeme klasifikovať na základe rôznych hľadísk. Z pohľadu priestorového usporiadania ich delíme na nulorozmerné (kvantové bodky), jednorozmerné (tenké monovrstvy využívané napr. v solárnych článkoch, optických kábloch, chemických senzoch), dvojrozmerné (uhlíkové nanorúrky) a trojrozmerné (fullerén, dendriméry) (Obr. 2). Nielen veľkosť ale aj tvar ovplyvňuje vlastnosti nanomateriálov. Podľa tvaru rozlišujeme nanoklietky, nanokryštály, nanopásky, nanovlákná, nanorúrky nazývané tiež nanotrúbice, nanodrôty, kvantové bodky a nanokompozity.¹¹ Ďalšie typy delenia sú uvedené v Tab. 1.

10 EUON - European Chemicals Agency. 2023a. *História nanomateriálov a nanotechnológie*, <https://euon.echa.europa.eu/sk/history-of-nanomaterials-and-nanotechnology>

11 DHAND, C. et al. 2015. *Methods and strategies for the synthesis of diverse nanoparticles and their applications: a comprehensive overview*. In *RSC Advances*, 5(127), p. 105003-105037.



Obr. 2: Klasifikácia nanomateriálov na základe nanorozmerov¹²



Obr. 3: Obrázky znázorňujú a) fullerén, b) grafén, c) uhlíkovú nanorúrku s jednou stenou a d) uhlíkovú nanorúrku s dvojitou stenou¹³

¹² BHATIA, T. 2022. Novel nanomaterials in forensic investigations: A review. In *Materials Today: Proceedings*, 50(5), p. 1071-1079.

¹³ Tamtiež.

Tab. 1: Klasifikácia nanomateriálov a charakteristika jednotlivých kategórií¹⁴

Na základe pôvodu
<p>Prírodné nanomateriály Vznikajú v prírode biologickou a antropogénnou činnosťou. Zemské vrstvy ako litosféra, atmosféra, hydrosféra a biosféra pozostávajú z týchto prirodzene sa vyskytujúcich nanomateriálov</p> <p>Syntetické nanomateriály Navrhnuté a vyrobené človekom na rôzne typy aplikácií. Môžu byť syntetizované fyzikálnymi, biologickými a chemickými metódami a mnohými hybridnými metódami alebo sú vyrábané rôznymi procesmi, ako je mechanické mletie, dym z výfuku motora atď.</p>
Na základe rozmeru v nanoúrovni
<p>Tieto sú klasifikované tiež na základe pohybu elektrónov pozdĺž dimenzie ako:</p> <p>Nularozmerné - 0D Existujú v bezrozmernom priestore alebo žiadny ich rozmer nie je väčší ako 100 nm. Príkladom sú uhlíkové kvantové bodyky.</p> <p>Jednorozmerné - 1D Vykazujú pohyb elektrónov pozdĺž osi x a majú jeden rozmer mimo nanoúrovne. Príkladom môžu byť nanorúrky, nanodrôty, atď.</p> <p>Dvojjozmerné - 2D Vykazujú pohyb elektrónov pozdĺž osi x a y a majú dva rozmery mimo nanoškály. Príkladom môžu byť nanopláty (nanosheets), niektoré varianty uhlíkových nanotrubic.</p> <p>Trojrozmerné - 3D Pohybujú sa pozdĺž osi x, y a z a nie sú obmedzené na nanorozsah v žiadnom rozmere. Príkladom môžu byť sypké prášky, zväzky nanodrôtov atď.</p>
Na základe materiálu
<p>Nanomateriály na báze uhlíka Ich hlavnou zložkou je uhlík. Sú morfológicky guľovité, duté, rúrkovité alebo elipsoidné.</p> <p>Fullerény Môžu to byť C60 alebo C70. Uhlíkové jednotky sú usporiadané v päťuholníkovom alebo šesťuholníkovom tvare a tvoria dutú klietku. Prítomná je hybridizácia sp².</p> <p>Grafén Je to alotrop uhlíka. Tvorí šesťhrannú sieť a má hrúbku 1 nm. Zobrazuje 2-rozmernú rovinnú geometriu povrchu.</p> <p>Uhlíkové nanorúrky Sú to podlhovasté uhlíkové trubice s priemerom 1–2 nm. Vykazujú podobnosť so samotným valcovaním grafénového listu. Vo všeobecnosti ide o jednostenné nanorúrky, dvojstenné nanorúrky a viacstenné nanorúrky.</p> <p>Uhlíkové nanovláčna Ide o podlhovasté valcové rúrky. Nano fólie z grafénu sa používajú na výrobu uhlíkových nanovláčien.</p> <p>Amorfny uhlík Je to uhlík ako amorfny materiál. Má guľovitý tvar s priemerom 20–70 nm.</p>

14 BHATIA, T. 2022. Novel nanomaterials in forensic investigations: A review. In *Materials Today: Proceedings*, 5(5), p. 1071-1079.

Organické nanomateriály

Pozostávajú z organickej hmoty a sú známe ako polymérne nanomateriály. Sú biologicky odbúrateľné a netoxické a sú široko používané v aplikáciách liečiv (na miesta lokálnych účinkov). Sú to morfológicky nanogulôčky a nanokapsuly. Lipozómy, feritín, micely a dendriméry možno uviesť ako príklady organických nanomateriálov.

Anorganické nanomateriály

V anorganických nanomateriáloch nie je prítomný uhlík. Sú stabilnejšie ako organické nanomateriály. Vykazujú hydrofilitu a biokompatibilitu a sú všeobecne klasifikované ako nanomateriály kovov a oxidov kovov.

Kovové nanomateriály

Tieto využívajú kovové prekurzory na syntézu čistých kovových nanomateriálov. Vykazujú charakteristické optoelektrické vlastnosti, proces ich syntézy je riadený ich tvarom, veľkosťou a plochou. Príkladom môžu byť nanočastice na báze Al, Cu, Ag, Au, Zn, Co, Cd, Fe. Štruktúrovaná morfológia je vo všeobecnosti tyčinkovitá, šesťuholníková, štvoruholníková, guľová, valcová a nepravidelná a vykazuje kryštalickú alebo amorfnú povahu.

Nanomateriály oxidov kovov

Tie sa syntetizujú, keď modifikujú a zlepšujú vlastnosti kovov. Ako niektoré príklady nanočastíc oxidov kovov možno uviesť napr. Fe₂O₃, TiO₂, ZnO, SiO₂, Al₂O₃.

Kompozitné nanomateriály

Sú to viacfázové nanočastice a nanomateriály, ktoré majú jednu fázu v nanorozmere. Môžu kombinovať nanočastice s inými nanočasticami, sypkými materiálmi alebo môžu vytvárať organické štruktúry. Predstavujú akúkoľvek kombináciu, napríklad uhlíkovú, organickú, kovovú atď.

Keramické nanomateriály

Sú to nekovové pevné látky, ktoré sa vo všeobecnosti syntetizujú zahrievaním alebo postupným chladením. Môžu byť amorfné, polykryštalické, porézne, husté alebo duté. Predstavujú výhodné aplikácie v oblasti katalýzy, fotokatalýzy, zobrazovania a fotodegradácie farbív.

Biologické nanomateriály

Nanočastice a nanomateriály pripravené v biologických systémoch tvoriacich jeden rozmer v rozsahu 1–100 nm. Prirodzene sa vyskytujúce nanočastice sa nazývajú bio nanočastice. Ide o dva typy, prvými sú intracelulárne štruktúry pozostávajúce z magnetozómov a druhými extracelulárne štruktúry pozostávajúce z lipoproteínov a vírusov.

Polovodičové nanomateriály

Materiály, ktoré vykazujú vlastnosti medzi kovmi a nekovmi. Energia zakázaného pásma je menšia ako 4 eV. Oxid kremičitý, arzenid gália sú niektoré z príkladov. Delia sa na dva typy, a to:

Vlastné (Intrinzné) polovodiče

Pozostávajú z čistých prvkov alebo zlúčenín. Sú nedopované.

Vonkajšie (Extrinzné) polovodiče

Vykonáva sa dopovanie jedného materiálu do druhého, aby sa vytvoril tento typ polovodiča, ktorý zvyšuje vodivosť. Patria sem polovodiče typu P a N.

Aplikácie nanomateriálov a nanopolymérov vo forenznej oblasti

Nano-trackery (nano-sledovacie zariadenia) a nano-kódy

Nano-trackery a nano-kódy sú využívané ako nástroje na prevenciu kriminality. Tieto trackery sú integrované do rôznych predmetov, aby sa udržala ich autenticita a zabránilo krádežiam. Pomáhajú aj pri sledovaní odsúdených osôb, ak sa pokúsia utiecť, tým že sú do ich tela predtým vpichneté. Sledovanie dôverných dôkazov je možné vďaka vloženiu nanopartikul do akéhokoľvek predmetu a vytvoreniu nano-kódov. Nano-kódy sú účinné pri zachovaní autenticity, integrity a spoľahlivosti dôkazov.

Kódovacie jednotky nano-kódov môžu byť rôznorodé, ako sú proteíny, nukleové kyseliny, chemické zlúčeniny a chromofory atď. Vo všeobecnosti ide teda o rôzne komponenty, ktoré tvoria kódy a následne umožňujú identifikovať a sledovať predmety alebo osoby vybavené nano-kódmi. Umožňujú tak jednoduché a efektívne sledovanie, autentifikáciu a zabezpečenie integrity dôležitých predmetov alebo dôkazov v oblasti bezpečnosti a forezných vied.¹⁵

Detekcia drog

Forezné testovanie drog sa zvyčajne začína predbežnými (orientačnými) testami, ako sú Marquisov test a iné bodové testy (založené na báze aplikácie reakčných činidiel a následných farebných reakcií detegujúcich prítomnosť látky), a následne sa vykoná potvrdzujúci (špecifický) test pomocou rôznych chromatografických metód, ako sú vysokoúčinná kvapalinová chromatografia (HPLC), vysokoúčinná tenkovrstvová chromatografia (HPTLC), reverzná fáza/HPLC a spektrofotometrické techniky, ako sú plynová chromatografia/hmotnostná spektrometria (GC/MS), kvapalinová chromatografia/hmotnostná spektrometria (LC/MS), infračervená spektroskopia s Fourierovou transformáciou (FTIR), jadrová magnetická rezonancia (NMR), Ramanova spektroskopia, UV spektroskopia a hmotnostná spektrometria. Tieto prístroje sú obmedzené na laboratóriá, ale s pomocou nanomateriálov, nanoprotonov a nanočipov sa detekcia nelegálnych drog vo forezných vedách stala efektívnejšou.¹⁶

Takto bola úspešne vykonaná detekcia kodeínu a morfínu s využitím uhlíkových nanotrubic, kokaínu s použitím kvantových bodiek, polovodičových a kovových nanočastíc a nanočipov, klonazepamu s využitím zlatých nanočastíc, metamfetamínu pomocou strieborného nanočasticového mikrofluidného čipu. Publikovaná bola tiež 'on-spot' detekcia klonazepamu pomocou zlatých nanopartikul z biologických vzoriek. Tieto

15 PANDYA, A., SHUKLA, R. K. 2018. *New perspective of nanotechnology: role in preventive forensic. In Egyptian Journal of Forensic Sciences, 8, p. 1-11.*

16 KLEIN, R. F., HAYS, P. A. 2003. *Detection and analysis of drugs of forensic interest, 1992-2001; A literature review. In Microgram, 1(1-2), p. 55-153.*

metódy a technológie prinášajú do forenzných analýz možnosť rýchleho skrínungu drog v reálnom čase, priamo na mieste činu.^{17, 18, 19, 20}

Technológia senzorov

Kvantové bodky predstavujú novú generáciu nanočastíc. Kvantové bodky sú nanočastice, ktoré majú veľmi malé rozmery v rozsahu od 1 do 10 nanometrov. Tieto častice majú špecifické vlastnosti, ktoré zahŕňajú vysoký kvantový výťažok (účinnosť emisie svetla), ostré spektrálne pásma (schopnosť emitovať svetlo pri veľmi presne definovaných vlnových dĺžkach) a výborné optické vlastnosti, ako je jas, dlhá životnosť a schopnosť vytvoriť rôzne farby vo viditeľnej oblasti spektra. Medzi preferované typy kvantových bodiek patria kvantové bodky na báze uhlíka, grafénové kvantové bodky a kremíkové kvantové bodky. Tieto typy sa uprednostňujú pre ich menšiu toxicitu a dostupnosť prípravku z prírodných zdrojov.²¹

Kvantové bodky vykazujú luminiscenčné vlastnosti, ktoré pomáhajú pri skrínungu a snímaní organických a anorganických materiálov. Táto technológia poskytuje jednoduché a cenovo dostupné riešenia k existujúcim. Manganom dopované kvantové bodky sulfidu zinočnatého (Mn-dopované ZnS kvantové bodky) predstavujú nový spôsob výroby senzorov, pretože sú menej toxické, majú vysokú pevnosť a majú nízku tendenciu samohasenia.

Tieto senzory s využitím kvantových bodiek majú širokú škálu aplikácií. Patrí sem detekcia toxínov, ako sú kokaín a jeho metabolity, v orálnej tekutine a sére pomocou Mn-dopovaných kvantových bodiek ZnS.²² Používajú sa aj na detekciu plynného jedu, ako je sírovodík, pomocou senzorov na báze uhlíkových kvantových bodiek.²³ Senzory na báze grafénu úspešne detegovali kyanidové ióny.²⁴

17 MOKHTARI, A., KARIMI-MALEH, H., ENSAFI, A. A., BEITOLLAHI, H. 2012. Application of modified multiwall carbon nanotubes paste electrode for simultaneous voltammetric determination of morphine and diclofenac in biological and pharmaceutical samples. In *Sensors and Actuators B: Chemical*, 169, p. 96-105.

18 ZHANG, C. Y., JOHNSON, L. W. 2009. Single quantum-dot-based aptameric nanosensor for cocaine. In *Analytical chemistry*, 81(8), p. 3051-3055.

19 LODHA, A. S., PANDYA, A., SHUKLA, R. K. 2016. Nanotechnology: an applied and robust approach for forensic investigation. In *Forensic Research & Criminology International Journal*, 2(1), p. 00044.

20 ANDREOU, C. et al. 2013. Rapid detection of drugs of abuse in saliva using surface enhanced Raman spectroscopy and microfluidics. In *ACS nano*, 7(8), p. 7157-7164.

21 GANESAN, M., NAGARAJ, P. 2020. Quantum dots as nanosensors for detection of toxics: a literature review. In *Analytical Methods*, 12(35), p. 4254-4275.

22 CHANTADA-VÁZQUEZ, M. P. et al. 2018. Development and application of molecularly imprinted polymer-Mn-doped ZnS quantum dot fluorescent optosensing for cocaine screening in oral fluid and serum. In *Talanta*, 181, p. 232-238.

23 HOU, X., ZENG, F., DU, F., WU, S. 2013. Carbon-dot-based fluorescent turn-on sensor for selectively detecting sulfide anions in totally aqueous media and imaging inside live cells. In *Nanotechnology*, 24(33), p. 335502.

24 DONG, Y. et al. 2014. "Turn-on" fluorescent detection of cyanide based on polyamine-functionalized carbon quantum dots. In *RSC Advances*, 4(8), p. 3701-3705.

Senzory založené na báze kvantových bodiek sa používajú na skrýning a detekciu rôznych prchavých jedov, konkrétne metanolu, etanolu, acetónu, formaldehydu, uhľovodíkov a toluénu. Napríklad film z CdTe kvantových bodiek sa použil na detekciu acetónu, etanolu a 2-propanolu. Na detekciu plynného amoniaku sa použili senzory obsahujúce PbS kvantové bodky a TiO₂ nanorúrky.^{25,26}

Technológia snímania odtlačkov prstov

Odtlačky prstov patria k najvýznamnejším stopám, ktoré možno nájsť na mieste činu. Sú jedinečné pre jednotlivca a pomáhajú pri identifikácii. "Nano-odtlačky prstov" sú technikou novej generácie, ktorá využíva nanomateriály na vývoj a detekciu odtlačkov prstov. Tieto materiály majú malé rozmery na nanoškále a poskytujú rôzne výhody pri skúmaní a zviditeľňovaní odtlačkov prstov. Na analýzu a snímanie odtlačkov prstov sú používané rôzne druhy nanomateriálov. Tieto zahŕňajú nanočastice zlata (Au-NP), zinku (ZnO-NP), striebra (Ag-NP), oxidu kremičitého (SiO₂-NP), hliníka (Al₂O₃-NP) a fluorescenčné nanočastice na báze uhlíka.²⁷

Nanočastice zlata prvýkrát použil na vizualizáciu latentných odtlačkov prstov Saunders koncom 80. rokov 20. storočia. Choi a kol. vykonali detekciu odtlačkov prstov vyvinutím kovových nanopráškov.²⁸ Zlaté nanočastice sa využívajú na vizualizáciu latentných odtlačkov prstov v jednokrakovom postupe. Tie sa tiež používali ako neviditeľný atrament na písanie a potom boli vyvinuté selektívne pomocou roztokov soli zlata. Nanočastice zlata ponúkajú rôzne výhody, pretože sú inertné a odtlačky prstov, ktoré sa z nich vyvinú, môžu byť uchovávané dlhší čas. Chemické postupy môžu skomplikovať vznik latentných odtlačkov prstov, ak je obsah potu a obsah aminokyselín nízky. Na prekonanie tohto problému bola vyvinutá negatívna alebo opačná (reverzná) detekcia odtlačkov prstov, kde k reakcii dochádza medzi hrebeňmi odtlačkov prstov a nie na nich. To sa dosiahlo použitím nanočastíc zlata, po ktorých nasledovala precipitácia striebra.²⁹

S pokrokom v nanotechnológiách boli na detekciu odtlačkov prstov zavedené kvantové bodky. Najpopulárnejšie z nich boli kvantové bodky na báze sulfidu kademnatého,

25 BAKAR, N. A. et al. 2011. Fluorescence gas sensor using CdTe quantum dots film to detect volatile organic compounds. In *Materials Science Forum*, 663, p. 276-279.

26 LIU, Y. et al. 2016. Highly sensitive and selective ammonia gas sensors based on PbS quantum dots/TiO₂ nanotube arrays at room temperature. In *Sensors and Actuators B: Chemical*, 236, p. 529-536.

27 PRASAD, V., LUKOSE, S., AGARWAL, P., PRASAD, L. 2020. Role of nanomaterials for forensic investigation and latent fingerprinting - a review. In *Journal of forensic sciences*, 65(1), p. 26-36.

28 CHOI, M. J. et al. 2006. Preparation and evaluation of metal nanopowders for the detection of fingerprints on nonporous surfaces. In *Journal of Forensic Identification*, 56(5), p. 756.

29 SHENAWI, S., JABER, N., ALMOG, J., MANDLER, D. 2013. A novel approach to fingerprint visualization on paper using nanotechnology: reversing the appearance by tailoring the gold nanoparticles' capping ligands. In *Chemical Communications*, 49(35), p. 3688-3690.

teluridu kademnatého a selenidu kademnatého.^{30, 31, 32} Tieto kvantové bodky na báze kadmia poskytujú lepšie výsledky v porovnaní s konvenčnými práškovými metódami na odhaľovanie latentných odtlačkov prstov, ale predstavujú aj mnohé zdravotné a bezpečnostné problémy. Vďaka svojej malej veľkosti môžu preniknúť do buniek tela a sú reaktívne. Ako alternatíva k týmto toxickým kvantovým bodkám, boli syntetizované a úspešne použité na detekciu odtlačkov prstov kvantové bodky sulfidu zinočnatého (ZnS) a ukázalo sa, že sú menej toxické, ľahko vyrobitelné a cenovo dostupnejšie.³³

Vizualizácia odtlačkov prstov pomocou nanomateriálov získala na význame nielen vďaka svojej jedinečnej identifikačnej vlastnosti, ale tiež pomáha pri rozpoznávaní ďalších chemických látok (výbušné látky, drogy). Na vizualizáciu latentných odtlačkov prstov bol vyvinutý tiež nanohybrid na báze kvantových bodiek. Úspešne identifikoval a detegoval aj trinitrotoluén (TNT).³⁴

Aplikácie založené na DNA

DNA nanotechnológia využíva DNA na tvorbu látok v nano-rozmeroch. DNA nanotechnológia sa delí na dve hlavné oblasti. Prvou je nanotechnológia štruktúrovaná na báze DNA, pri ktorej sa skúma tvorba rôznych nano-architektúr a štruktúr pomocou DNA ako hlavného stavebného bloku. Tieto nano-štruktúry majú potenciál na využitie v materiálovom výskume a vytváraní nových nanomateriálov. Druhou oblasťou je dynamická DNA nanotechnológia, ktorá sa zaoberá tvorbou stimulov reagujúcich na rôzne biologické, chemické a fyzikálne podnety. Tieto stimuly môžu byť využité na riadenie procesov na molekulárnej úrovni.³⁵

Nanoprepínače DNA sú špeciálne návrhy DNA, ktoré majú schopnosť reagovať na cieľové molekuly DNA. Táto reakcia môže zahŕňať zmenu konfigurácie DNA z lineárnej na slučkový stav. Týmto spôsobom je možné selektívne rozpoznávať a reagovať na špecifické DNA sekvencie.³⁶ Polymerázová reťazová reakcia (PCR) je jednou z najdôležitejších a

30 MENZEL, E. R. et al. 2000. Photoluminescent CdS/dendrimer nanocomposites for fingerprint detection. In *Journal of Forensic Sciences*, 45(4), p. 770-773.

31 GAO, F. et al. 2011. The synthesis of newly modified CdTe quantum dots and their application for improvement of latent fingerprint detection. In *Nanotechnology*, 22(7), p. 075705.

32 WANG, Y. F. et al. 2009. Application of CdSe nanoparticle suspension for developing latent fingerprints on the sticky side of adhesives. In *Forensic Science International*, 185(1-3), p. 96-99.

33 MORET, S., BÉCUE, A., CHAMPOD, C. 2013. Cadmium-free quantum dots in aqueous solution: Potential for fingerprint detection, synthesis and an application to the detection of fingerprints in blood on non-porous surfaces. In *Forensic science international*, 224(1-3), p. 101-110.

34 WU, P. et al. 2015. Dual-emitting quantum dot nano hybrid for imaging of latent fingerprints: simultaneous identification of individuals and traffic light-type visualization of TNT. In *Chemical science*, 6(8), p. 4445-4450.

35 DELUCA, M. et al. 2020. Dynamic DNA nanotechnology: toward functional nanoscale devices. In *Nanoscale Horizons*, 5(2), p. 182-201.

36 ABRAHAM PUNNOOSE, J., HALVORSEN, K., CHANDRASEKARAN, A. R. 2020. DNA nanotechnology in the undergraduate laboratory: Analysis of molecular topology using DNA nanoswitches. In *Journal of chemical education*, 97(5), p. 1448-1453.

najrozšírenejších techník v genetickej a forenznej analýze. S použitím nanotechnológie bola vytvorená varianta PCR známa ako nano-PCR. Pri nano-PCR sa rôzne nanomateriály, vrátane zlatých nanopartikul (AuNP), integrujú do reakcie s cieľom zvýšiť jej citlivosť a špecifitu. Tieto nanomateriály pomáhajú urýchliť a presnejšie amplifikovať DNA, čím zlepšujú efektívnosť reakcie PCR.³⁷

Nanomedicína a nanotoxikológia

Nanomedicína je oblasť medicíny, kde sa využívajú funkčné nanopolyméry na detekciu, prevenciu a liečbu rôznych ochorení. S pokrokom v oblasti nanopolymérov boli prospešné pre rôzne oblasti, ako je dodávanie liekov, biomarkery, bioobrazovanie, biosenzory a terapie.

V rámci nanomedicíny sa využívajú rôzne technológie, vrátane detekcie a liečby ochorení na molekulárnej a bunkovej úrovni. Jedným z príkladov, je skúmanie nitrovania (proces pridávania nitrozo-skupiny) a jeho vplyv na bielkoviny v organizme. Nitrovanie bielkovín je procesom modifikácie bielkovín po translácii, ktorý mení ich vlastnosti a funkcie. Takéto modifikácie môžu viesť k vzniku rôznych porúch a ochorení, ako sú Parkinsonova a Alzheimerova choroba, rakovina, depresia a diabetes. Využitím moderných nanočastíc bolo možné vykonať detekciu nitrácie tryptofánu a tyrozínu pomocou nanočastíc ZnO a pomocou teórie funkcie hustoty.³⁸

Pre diagnostiku a určenie príčiny smrti je dôležité monitorovanie liekov a toxínov v oblasti toxikológie a autopsií. V tomto kontexte môžu nanosenzory a nanomateriály poskytnúť viaceré výhody. Nanosenzory majú výhodu v extrémnej citlivosti na určité látky. To je obzvlášť dôležité pri hľadaní stopových množstiev toxínov alebo liekov, ktoré by inak mohli uniknúť pozornosti. Umožňujú rýchlejšie a efektívnejšie analýzy, pričom niektoré nanosenzory sú schopné sledovať hladiny látok v reálnom čase. Nanosenzory môžu pri pitvách pomôcť pri presnejšom zistení, či boli v tele prítomné určité toxické látky alebo lieky, ktoré by mohli súvisieť so smrťou. Vo všeobecnosti možno konštatovať, že nanosenzory a nanomateriály v oblasti toxikológie a autopsií zlepšujú schopnosť monitorovať hladiny látok v ľudskom tele, identifikovať toxíny alebo lieky a prispievajú k zvýšeniu presnosti diagnostiky a určenia príčiny smrti.³⁹

Bezpečnostné dokumenty

Falšovanie dokumentov je vážnym problémom každej ekonomiky. Každým dňom narastá, keďže sa vo veľkom vyrábajú falošné peniaze, doklady, dokumenty a produkty. Dôvernosc

37 PAN, D. et al. 2012. Genetic analysis with nanoPCR. In *Integrative Biology*, 4(10), p. 1155-1163.

38 MADDAHI, P. S., YEGANEH, M., BAGHSIYAH, F. B. 2019. ZnO nanoparticles as a sensitive platform for detection of nitration in tyrosine and tryptophan: A DFT study. In *Materials Chemistry and Physics*, 237, p. 121857.

39 BHATIA, T. 2022. Novel nanomaterials in forensic investigations: A review. In *Materials Today: Proceedings*, 50(5), p. 1071-1079.

a bezpečnosť základných identifikačných dokumentov sú veľmi dôležité. Na zlepšenie bezpečnosti dokumentov sa zavádzajú rôzne bezpečnostné prvky, ako sú bezpečnostné vlákna, vodoznaky, opticky premenlivé atramenty, fluorescenčné atramenty a hologramy, aby sa znížila možnosť falšovania. V súčasnosti sa na zvýšenie bezpečnosti dokumentov často používajú nanopartikelky, ktoré nahradili fosfory a luminiscenčné prášky.⁴⁰

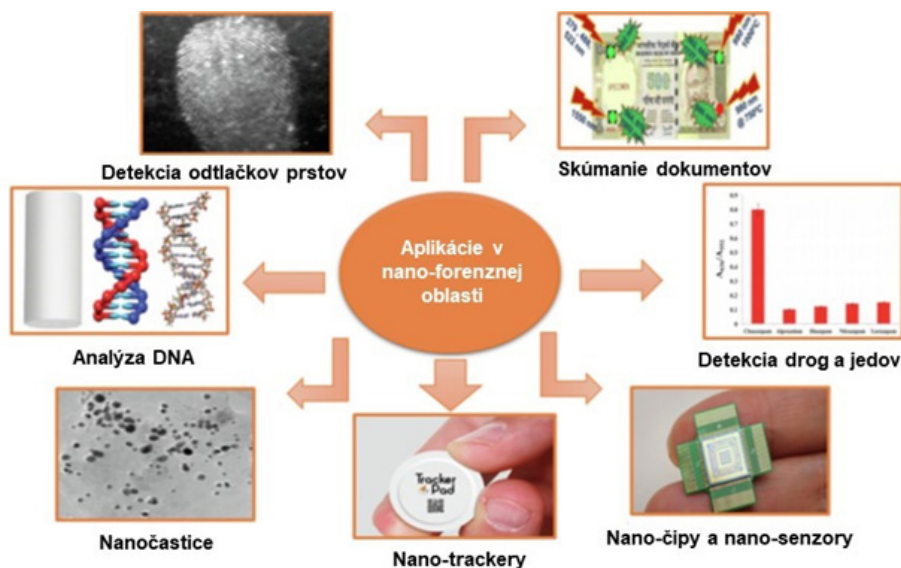
Luminiscenčné nanopartikelky, ako sú kvantové bodky, sa zavádzajú do atramentu alebo papiera a vytvárajú protifalzifikačné atramenty. Tieto bezpečnostné atramenty predstavujú pokročilé vysokotechnologické riešenia na riešenie problému falšovania. Lantanoidmi dopované luminiscenčné nanomateriály, polovodiče, uhlíkové kvantové bodky a plazmonické nanomateriály sa široko používajú na výrobu týchto bezpečnostných atramentov. Lantanoidmi dopované luminiscenčné nanomateriály obsahujú lantanoidy, ktoré majú výnimočné luminiscenčné vlastnosti, takže keď sú pridané do atramentu, zabezpečujú vytvorenie bezpečnostných značiek, ktoré sú viditeľné len pod určitým svetlom alebo pod špeciálnym zariadením. Polovodiče a uhlíkové kvantové bodky majú schopnosť emitovať svetlo pri určitých vlnových dĺžkach, takže pridaním do atramentu alebo papiera, umožňujú vytvorenie mikroskopických značiek, ktoré sú ťažko viditeľné bez špeciálneho zariadenia. Plazmonické nanomateriály interagujú s elektromagnetickým žiarením a majú schopnosť meniť svoje optické vlastnosti v závislosti od okolitého prostredia. Ich použitie v bezpečnostných atramentoch umožňuje vytváranie značiek, ktoré môžu meniť farbu alebo tvar v reakcii na rôzne podmienky, čo z nich robí veľmi ťažko falšovateľné prvky.

Zavádzanie týchto rôznorodých nanomateriálov do bezpečnostných dokumentov umožňuje vytvárať komplexné značky, ktoré sú ťažko falšovateľné a zvyšujú bezpečnosť dôležitých dokumentov.⁴¹

Rôzne aplikácie nanomateriálov vo forenznej oblasti sú znázornené na obr. 4.

40 KESARWANI, S. et al. 2020. Nano-forensic: new perspective and extensive applications in solving crimes. In *Latent in applied nanobioscience*, 10(1), p. 1792-1798.

41 KUMAR, P., SINGH, S., GUPTA, B. K. 2016. Future prospects of luminescent nanomaterial based security inks: from synthesis to anti-counterfeiting applications. In *Nanoscale*, 8(30), p. 14297-14340.



Obr. 4: Aplikácie nanopolymérov a nanomateriálov vo forenznej oblasti⁴²

Aktuálne výzvy a perspektívy rozvoja nanotechnológií

Nanotechnológie, ako oblasť materiálových vied sú relatívne mladé, a preto je potrebný rozsiahly výskum na vývoj nových polymérov. Kľúčovým faktorom je presné zhodnotenie rizík a udržateľnosti nanomateriálov. Budúcnosť nanomateriálov závisí na ich bezpečnosti a ekologickom dopade.

V oblasti forenzného výskumu sa tiež očakávajú výrazné posuny vo forme vývoja nových typov pokročilých techník, vrátane miniaturizácie, nanovýroby, nanoinstrumentácie a tzv. čipových mini-laboratórií (lab-on-chips). Tento koncept spočíva v miniaturizácii tradičných laboratórnych postupov a techník, umožňujúc analyzovať vzorky kvapalín alebo plyných vzoriek vo veľmi malých množstvách na jednom mikročipe. Lab-on-a-chip využíva mikrotechnológie, mikrofluidiku a nanotechnológie.

V súčasnosti sa nanomateriály prvej generácie, najmä nanočastice, rozsiahlo využívajú v komerčných aplikáciách, vrátane textílií, kozmetiky, opaľovacích krémov, zubných výplní a polovodičov. Najnovšie však druhá generácia nanoštruktúrovaných materiálov prináša ešte pokročilejšie využitie, ako sú senzory, ovládače, ciele dodávky liekov a samostatne zostavené štruktúry. Na horizonte sa črtá tretia a štvrtá generácia nanotechnológií, ktoré zahŕňajú 3D nanosystémy a zložité heterogénne nanoštruktúry.⁴³

⁴² BHATIA, T. 2022. Novel nanomaterials in forensic investigations: A review. In *Materials Today: Proceedings*, 50(5), p. 1071-1079.

⁴³ BHATIA, T. 2022. Novel nanomaterials in forensic investigations: A review. In *Materials Today: Proceedings*, 50(5), p. 1071-1079.

Záver

Oblasť výskumu materiálov výrazne pokročila vďaka vývoju nových polymérnych materiálov, vrátane nanomateriálov. Tieto inovatívne materiály s pokročilými vlastnosťami našli uplatnenie v rôznych odvetviach vrátane biomedicíny, fyziky, vedy o materiáloch a elektronického inžinierstva. Sú široko využívané aj v rámci rôznych forenzných aplikácií, vrátane detekcie drog, toxikológie, analýzy odtlačkov prstov, skúmania dokumentov, analýzy DNA, senzorov a sledovačov. Zavedenie nanomateriálov a nanotechnológií do oblasti forenzných vied výrazne zlepšilo proces forenzného skúmania a vyšetrovania, skrátilo čas potrebný na analýzu, zvýšilo presnosť a selektivitu, a umožnilo detegovať kriminalistické stopy na nano úrovni pomocou rôznych mikroskopických, chromatografických a spektroskopických techník, a týmito modernými prístupmi prispelo k výraznému zvýšeniu efektívnosti týchto techník.

Literatúra

1. ABRAHAM PUNNOOSE, J., HALVORSEN, K., CHANDRASEKARAN, A. R. 2020. DNA nanotechnology in the undergraduate laboratory: Analysis of molecular topology using DNA nanoswitches. In *Journal of chemical education*, 97(5), p. 1448-1453.
2. ANDREOU, C. et al. 2013. Rapid detection of drugs of abuse in saliva using surface enhanced Raman spectroscopy and microfluidics. In *ACS nano*, 7(8), p. 7157-7164.
3. BAKAR, N. A. et al. 2011. Fluorescence gas sensor using CdTe quantum dots film to detect volatile organic compounds. In *Materials Science Forum*, 663, p. 276-279.
4. BHATIA, T. 2022. Novel nanomaterials in forensic investigations: A review. In *Materials Today: Proceedings*, 50(5), p. 1071-1079.
5. DELUCA, M. et al. 2020. Dynamic DNA nanotechnology: toward functional nanoscale devices. In *Nanoscale Horizons*, 5(2), p. 182-201.
6. DHAND, C. et al. 2015. Methods and strategies for the synthesis of diverse nanoparticles and their applications: a comprehensive overview. In *RSC Advances*, 5(127), p. 105003-105037.
7. DONG, Y. et al. 2014. "Turn-on" fluorescent detection of cyanide based on polyamine-functionalized carbon quantum dots. In *RSC Advances*, 4(8), p. 3701-3705.
8. EUON - European Chemicals Agency. 2023a. *História nanomateriálov a nanotechnológie*, <https://euon.echa.europa.eu/sk/history-of-nanomaterials-and-nanotechnology>
9. EUON - European Chemicals Agency. 2023b. *Nanomateriály*. <https://euon.echa.europa.eu/sk/general-information>
10. GANESAN, M., NAGARAJ, P. 2020. Quantum dots as nanosensors for detection of toxics: a literature review. In *Analytical Methods*, 12(35), p. 4254-4275.
11. GAO, F. et al. 2011. The synthesis of newly modified CdTe quantum dots and their application for improvement of latent fingerprint detection. In *Nanotechnology*, 22(7), p. 075705.
12. HOU, X., ZENG, F., DU, F., WU, S. 2013. Carbon-dot-based fluorescent turn-on sensor for selectively detecting sulfide anions in totally aqueous media and imaging inside live cells. In *Nanotechnology*, 24(33), p. 335502.

13. CHANTADA-VÁZQUEZ, M. P. et al. 2018. Development and application of molecularly imprinted polymer-Mn-doped ZnS quantum dot fluorescent optosensing for cocaine screening in oral fluid and serum. In *Talanta*, 181, p. 232-238.
14. CHEN, Y. F. 2011. Forensic applications of nanotechnology. In *Journal of the Chinese Chemical Society*, 58(6), p. 828-835.
15. CHOI, M. J. et al. 2006. Preparation and evaluation of metal nanopowders for the detection of fingerprints on nonporous surfaces. In *Journal of Forensic Identification*, 56(5), p. 756.
16. KESARWANI, S. et al. 2020. Nano-forensic: new perspective and extensive applications in solving crimes. In *Latent in applied nanobioscience*, 10(1), p. 1792-1798.
17. KLEIN, R. F., HAYS, P. A. 2003. Detection and analysis of drugs of forensic interest, 1992-2001; A literature review. In *Microgram*, 1(1-2), p. 55-153.
18. KUMAR, P., SINGH, S., GUPTA, B. K. 2016. Future prospects of luminescent nanomaterial based security inks: from synthesis to anti-counterfeiting applications. In *Nanoscale*, 8(30), p. 14297-14340.
19. LIU, Y. et al. 2016. Highly sensitive and selective ammonia gas sensors based on PbS quantum dots/TiO₂ nanotube arrays at room temperature. In *Sensors and Actuators B: Chemical*, 236, p. 529-536.
20. LODHA, A. et al. 2013. Melamine modified gold nanoprobe for "on-spot" colorimetric recognition of clonazepam from biological specimens. In *Analyst*, 138(18), p. 5411-5416.
21. LODHA, A. S., PANDYA, A., SHUKLA, R. K. 2016. Nanotechnology: an applied and robust approach for forensic investigation. In *Forensic Research & Criminology International Journal*, 2(1), p. 00044.
22. MADDAHI, P. S., YEGANEH, M., BAGHSIYAH, F. B. 2019. ZnO nanoparticles as a sensitive platform for detection of nitration in tyrosine and tryptophan: A DFT study. In *Materials Chemistry and Physics*, 237, p. 121857.
23. MENZEL, E. R. et al. 2000. Photoluminescent CdS/dendrimer nanocomposites for fingerprint detection. In *Journal of Forensic Sciences*, 45(4), p. 770-773.
24. MOKHTARI, A., KARIMI-MALEH, H., ENSAFI, A. A., BEITOLLAHI, H. 2012. Application of modified multiwall carbon nanotubes paste electrode for simultaneous voltammetric determination of morphine and diclofenac in biological and pharmaceutical samples. In *Sensors and Actuators B: Chemical*, 169, p. 96-105.
25. MORET, S., BÉCUE, A., CHAMPOD, C. 2013. Cadmium-free quantum dots in aqueous solution: Potential for fingerprint detection, synthesis and an application to the detection of fingerprints in blood on non-porous surfaces. In *Forensic science international*, 224(1-3), p. 101-110.
26. NANOMATERIÁL. 2022. EUR-lex: Odporúčanie Komisie z 10. júna 2022 týkajúce sa vymedzenia pojmu nanomateriál (2022/C 229/01), Dostupné online, [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0614\(01\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0614(01)&from=EN)
27. NANOTECHNOLOGIES - Plain language explanation of selected terms from the ISO/IEC 80004 series. 2017. Online Browsing Platform (OBP). Dostupné online, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:18401:ed-1:v1:en>

28. PAN, D. et al. 2012. Genetic analysis with nanoPCR. In *Integrative Biology*, 4(10), p. 1155-1163.
29. PANDYA, A., SHUKLA, R. K. 2018. New perspective of nanotechnology: role in preventive forensic. In *Egyptian Journal of Forensic Sciences*, 8, p. 1-11.
30. PRASAD, V., LUKOSE, S., AGARWAL, P., PRASAD, L. 2020. Role of nanomaterials for forensic investigation and latent fingerprinting - a review. In *Journal of forensic sciences*, 65(1), p. 26-36.
31. SAMANTA, A., MEDINTZ, I. L. 2016. Nanoparticles and DNA - a powerful and growing functional combination in bionanotechnology. In *Nanoscale*, 8(17), p. 9037-9095.
32. SHENAWI, S., JABER, N., ALMOG, J., MANDLER, D. 2013. A novel approach to fingerprint visualization on paper using nanotechnology: reversing the appearance by tailoring the gold nanoparticles' capping ligands. In *Chemical Communications*, 49(35), p. 3688-3690.
33. WANG, Y. F. et al. 2009. Application of CdSe nanoparticle suspension for developing latent fingermarks on the sticky side of adhesives. In *Forensic Science International*, 185(1-3), p. 96-99.
34. WU, P. et al. 2015. Dual-emitting quantum dot nanohybrid for imaging of latent fingerprints: simultaneous identification of individuals and traffic light-type visualization of TNT. In *Chemical science*, 6(8), p. 4445-4450.
35. ZHANG, C. Y., JOHNSON, L. W. 2009. Single quantum-dot-based aptameric nanosensor for cocaine. In *Analytical chemistry*, 81(8), p. 3051-3055.