



# Aplicación de los nanomateriales en la mejora de autopartes: inicio de una nueva era en el desarrollo de automóviles

Rafael Álvarez Chimal<sup>1</sup>, Rosario Tavera Hernández<sup>2</sup> y Jesús Ángel Arenas Alatorre<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Materia Condensada, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, Coyoacán, 04510, México

<sup>2</sup> Departamento de Productos Naturales, Instituto de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, Coyoacán, 04510, México

[ac.rafael.11@gmail.com](mailto:ac.rafael.11@gmail.com)

## Resumen

Los nanomateriales son materiales extremadamente pequeños, con dimensiones que se encuentran en el rango de 1 a 100 nanómetros. Esto les permite tener propiedades ópticas, eléctricas, magnéticas y mecánicas únicas, lo que los hace ideales para su empleo en la fabricación de automóviles. Dentro de la gran cantidad de autopartes que conforman un vehículo, los nanomateriales pueden aplicarse para mejorar todas ellas: varias partes del motor, estructura del automóvil, pintura, neumáticos, interiores, luces, parabrisas, baterías y componentes electrónicos, aunado al costo/beneficio que trae su implementación. Todo lo anterior tiene por objeto desarrollar vehículos más resistentes, seguros, ligeros y que disminuyan o eviten por completo la emisión de

contaminantes. Con el uso de nanomateriales se pretende llevar a los automóviles a una nueva era.

## Palabras clave:

Nanomateriales, autopartes, vehículos eléctricos, semiconductores, modernidad, ambiente y tecnología.

## Introducción

En la industria automotriz, los nanomateriales forman parte importante de los diferentes componentes que constituyen a los automóviles. Algunos ejemplos incluyen los que se encuentran en las piezas del motor, principalmente, para evitar su desgaste y mejorar su eficiencia. Estos son materiales ligeros (que favorecen al ahorro y aprovechamiento de combustible), pero al mismo

tiempo resistentes para soportar impactos. También, los nanomateriales se adicionan a los neumáticos, pinturas y recubrimientos (lo que permite reducir el daño por lluvia o calor). En partes electrónicas, como las baterías y los convertidores catalíticos, se usan para mejorar su eficiencia y disminuir las emisiones contaminantes. Por sus características, el objetivo que tienen estos materiales es mejorar las diferentes piezas que conforman a los automóviles, implicando un beneficio en el desarrollo de este, así como la optimización y beneficios en el ahorro en costos de producción.

### Los nanomateriales en la industria automotriz

Los nanomateriales poseen tamaños que se encuentran en el rango de 1 a 100 nm<sup>1</sup> [Figura 1]. Estos materiales han adquirido importancia e interés en los últimos años debido a la gran cantidad de aplicaciones que tienen, ya que la materia a esa escala presenta un acomodo más compacto de átomos y moléculas, lo que genera que se presenten fenómenos y propiedades óp-

ticas, magnéticas o eléctricas totalmente diferentes a sus homólogos macroscópicos<sup>2</sup>. Nanoestructuras como el grafeno, nanotubos de carbono, nanoarcillas, nanopartículas, nanopolímeros y nanorecubrimientos han sido estudiadas y aplicadas en la industria automotriz, buscando satisfacer las altas demandas de que existe en esta área: mejoramiento del desempeño del motor, seguridad, neumáticos, equipos de alta resolución, sensores, autopartes más ligeras, vehículos más durables e inteligentes. Aunado a esto, se busca reducir o eliminar la emisión de contaminantes y disminuir los costos de producción [Figura 2]<sup>3</sup>.

### ¿Dónde se aplican los nanomateriales en los motores?

En la actualidad, los motores tienen componentes que los hacen más pequeños y ligeros, pero con la capacidad de ser más potentes. Los nanomateriales que se están usando para lograr estas características, como los nanotubos de carbono, favorecen una mayor resistencia (comparado con el acero), pero con las características de ser más ligero

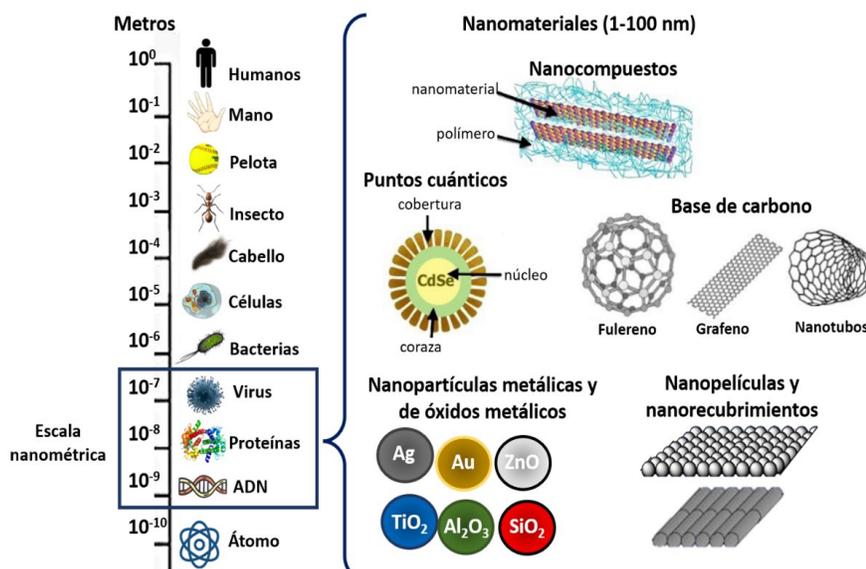


Figura 1. Escala nanométrica y algunos nanomateriales

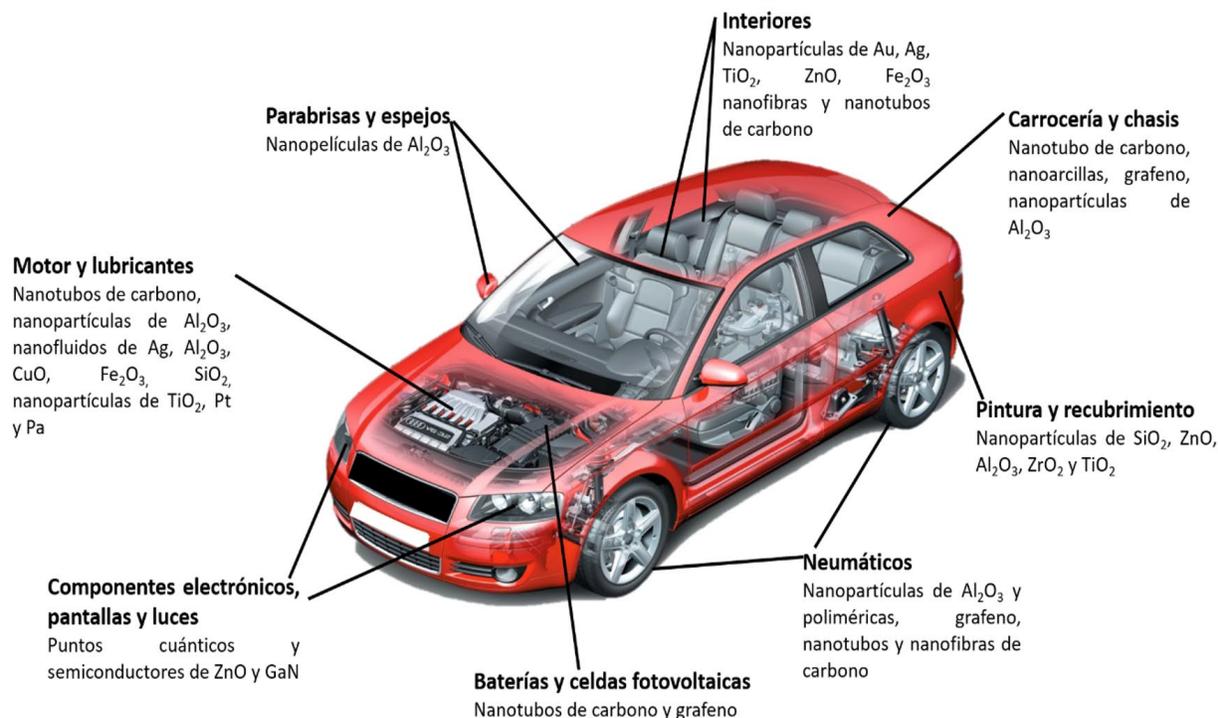


Figura 2. Los nanomateriales más usados en las diferentes partes de un automóvil

que el aluminio (además de que soportan las altas temperaturas que se generan durante su desempeño<sup>4</sup>).

Otras alternativas que existen son los recubrimientos con nanopelículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  y  $\text{SiO}_2$  en las paredes de los cilindros para minimizar el calor generado por la fricción y un aumento del trabajo, haciéndolos más eficientes<sup>5,6</sup>. Las nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mejoran la conductividad térmica entre un 4.2 y 4.5 % en los motores a temperaturas que van de los 30 a los 50 °C. Además, el aumento de la concentración de nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en el anticongelante mejora la refrigeración del motor<sup>7</sup>.

La adición de nanofluidos que contienen nanopartículas de Ag,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CuO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  suspendidas en agua, aceite de motor o el combustible ayudan a mejorar la conductividad térmica y contribuyen a

reducir las emisiones de contaminantes como los  $\text{NO}_x$  y el CO hasta en un 13 y un 20.5 %, respectivamente<sup>8</sup>.

El uso de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , Pt y Pd en los convertidores catalíticos beneficia la reducción de contaminantes<sup>9</sup>. Mazda, por ejemplo, modificó un catalizador incrustando nanopartículas metálicas para reducir entre un 70 y un 90 % el empleo de metales como el Pd y el Pt<sup>10</sup>. Asimismo, Toyota introdujo un compuesto de nailon con nanoarcillas en las bandas del engranaje de distribución, logrando una mayor estabilidad y resistencia al calor<sup>11</sup>.

### Los neumáticos, ¿cómo se benefician?

Para garantizar el funcionamiento seguro de los automóviles es necesario adoptar neumáticos basados en nanomateriales. El rendimiento de éstos está influenciado

por la composición de la capa exterior, de modo que los materiales que se encuentren bajo ese revestimiento tengan una vida útil más larga<sup>12</sup>.

El uso de nanopartículas poliméricas, grafeno, nanofibras y nanotubos de carbono en compuestos de caucho aumenta la seguridad y durabilidad de los neumáticos<sup>13</sup>. También, la adición de nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  al caucho mejora la resistencia al desgaste hasta en un 800 %, comparado con los neumáticos tradicionales<sup>14</sup>.

### En la carrocería y el chasis también son utilizados

Debido a que los nanomateriales tienen propiedades que los hacen más ligeros y resistentes, estos resultan ser importantes para reducir el peso de los vehículos. Esta acción los hace más seguros de conducir, además de que aumenta la eficiencia del combustible, reduce la emisión de contaminantes al ambiente y otorga una mayor protección contra choques<sup>3</sup>.

El uso de nanomateriales impacta en el costo total directo del vehículo, reduciendo los precios por la disminución del peso y los procesos de producción. Por ejemplo, los nanotubos de carbono, grafeno, nanoarcillas de poliamidas, Mg, Al y Si son más ligeros en cuanto a peso y tienen propiedades térmicas superiores a los que se comercializan actualmente a base de metales y plásticos, lo que mejora la resistencia general y la durabilidad de los automóviles<sup>15,16</sup>.

El chasis (que es un ejemplo de esto) es la estructura o armazón de carga de un vehículo, es decir, el esqueleto que soporta estructuralmente el peso de los componentes del automóvil y los ocupantes. Por sus

características, el chasis debe ser ligero y lo suficientemente resistente para soportar todo el equipo que se monte sobre él<sup>17</sup>.

Por su parte, el grafeno (capa bidimensional de átomos de carbono entramados hexagonalmente) es uno de los nanomateriales más usados en la industria automotriz. Los automóviles en los que se utiliza grafeno son mucho menos pesados y más resistentes (hasta 200 veces más) que el acero, fibra de carbono y componentes de aluminio<sup>18</sup>. General Motors, por ejemplo, ha disminuido el uso de termoplásticos en las carrocerías cambiándolos por nanoarcillas<sup>19</sup>.

### Pinturas y recubrimientos no son la excepción

Dentro de la industria automotriz, una de las áreas en donde los nanomateriales son más utilizados es en el desarrollo de pinturas y recubrimientos.

El recubrimiento de las carrocerías con nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Zn y ZnO permite mejorar su protección y su resistencia al rayado, además de favorecer al aspecto y proporciona una mayor durabilidad<sup>20</sup>. La capa más externa de pintura protege al automóvil del entorno climático exterior ya que, debido a las condiciones meteorológicas extremas a las que los vehículos están expuestos, se pueden causar grietas y desgaste en las superficies de la carrocería<sup>21</sup>.

Un ejemplo son las nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ , ZnO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  y  $\text{TiO}_2$  aplicadas en recubrimientos poliméricos, las cuales aumentan su dureza, rellenan los poros y suprimen el desarrollo de grietas, lo cual protege al automóvil del desgaste por rayado, agrietamiento y fricción<sup>22,23</sup>.

Una parte atractiva del uso de los nanomateriales en la pintura es “la posibilidad de variar el color en cuestión de minutos, con algo tan sencillo como apretar un botón”. Esto es posible gracias a la capacidad que tienen ciertos materiales (presentes en los recubrimientos) de cambiar la forma en la que se refleja la luz<sup>24</sup>.

También se están utilizando nanorevestimientos a base de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ , que tienen propiedades autorreparadoras y que son capaces de mejorar las propiedades anticorrosivas del metal<sup>21</sup>. Marcas como Volkswagen recubren las superficies de sus automóviles con nanopelículas impermeables y antipolvo<sup>25</sup>. Mercedes Benz ha implementado una nanopintura que es 300 % más resistente a los rayones, agregando nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  y aglutinantes orgánicos que hacen que la pintura tradicional adquiera una estructura más densa<sup>26</sup>.

### ¿Qué hay de los interiores?

En los asientos, tableros, techos y vestiduras interiores se está incorporando tanto al grafeno (por su capacidad de autolimpieza) como a las nanofibras de carbono, que son conductoras térmicas y proporcionan interiores más cómodos<sup>18</sup>.

En los filtros de aire de los automóviles se usan nanopartículas de Au, Ag,  $\text{TiO}_2$ , ZnO, ya que su capacidad antimicrobiana permite reducir las posibilidades de colonización y posterior infección de los ocupantes<sup>27-29</sup>.

La aplicación de filtros recubiertos con nanofibras ha demostrado ser un método eficaz para garantizar una calidad adecuada de aire al interior del automóvil<sup>15</sup>. Además, los nanotubos de carbono, nanomateriales de plata y nanopartículas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pueden

utilizarse como relleno en los tejidos de los automóviles; esto reduce las posibilidades de incendios en caso de accidentes<sup>21,30</sup>.

### ¡Hasta en los espejos y parabrisas!

La aplicación de nanopelículas antirreflejantes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  y ZnO (de menos de 100 nm) sobre el parabrisas mejora la seguridad al filtrar los rayos UV, además de disminuir el deslumbramiento de las luces de los automóviles que circulan en sentido contrario. La superficie de los espejos retrovisores también están protegidos de la suciedad y el agua por estas mismas nanopelículas<sup>21,31</sup>.

Volkswagen y Toyota también recubren los parabrisas, ventanas y espejos de sus autos con nanocompuestos, esto con la finalidad de evitar que se ensucien, filtrar los rayos UV y de que se empañen con el frío, el calor o la lluvia<sup>11,25</sup>.

### Sin olvidar componentes electrónicos y eléctricos

La eficiencia energética, resistencia y productos más baratos son algunos de los avances en la iluminación de los automóviles.

Los “puntos cuánticos”, que son nanomateriales de entre 2 y 10 nm, tienen propiedades semiconductoras y pueden convertir un espectro de luz entrante en una frecuencia de salida de energía diferente, haciendo luces sintonizables que son aplicables en la iluminación interior y exterior de los automóviles, así como controlar los componentes electrónicos que gestionan los motores<sup>32</sup>.

Por otro lado, las nanopartículas de ZnO y las basadas en Ga son altamente semiconductoras, permitiendo que los fotones se puedan emitir desde ellos. Los LED (diodos emisores de luz) rojos, anaranjados y amari-

llos emiten fotones desde una capa emisora inorgánica a base de estas nanopartículas, lo que permite el desarrollo de pantallas y componentes eléctricos, además de ser parte fundamental en la elaboración de los dispositivos (chips) que controlan al auto<sup>32-34</sup>.

## En los automóviles eléctricos también participan

Se considera que el futuro –o quizá ya el presente de los automóviles– está en los vehículos eléctricos, los cuales son propulsados por uno o más motores eléctricos. Al tener instalados baterías, paneles solares o generadores eléctricos, estos proveen la energía suficiente para que el automóvil se pueda mover. Esto reduce significativamente la emisión de contaminantes en comparación con los vehículos a gasolina<sup>35</sup>.

Los nanotubos de carbono tienen propiedades eléctricas similares a las que tienen las terminales positivas y negativas de las baterías de iones de Li, además de que se necesita que estas sean ricas en carbono [Figura 3]. También se espera que los nanotubos de carbono se apliquen en módulos de potencia y celdas fotovoltaicas. Las pro-

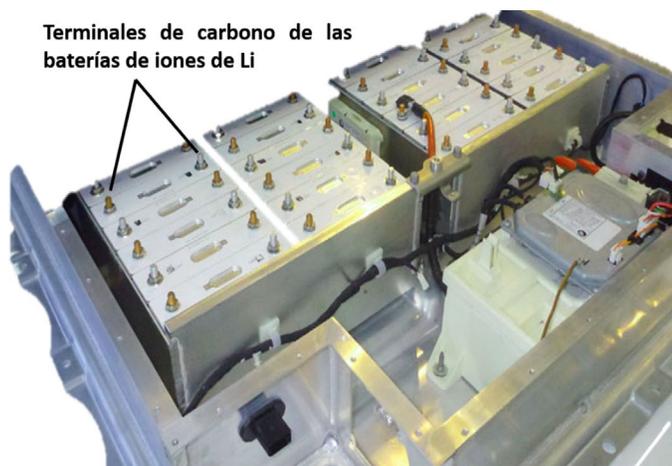


Figura 3. Acomodo de las baterías en el chasis de un automóvil eléctrico, se indican las terminales donde se conectan

piedades conductoras y de almacenaje de energía de los nanotubos de carbono son de interés en el sector de la energía solar debido a que la almacenan en su estructura reticular y la liberan al cambiar de forma (por un estímulo como la temperatura o un catalizador). Esto les permite recargarse en cuestión de segundos (por estas modificaciones en sus conformaciones), abriendo un campo importante en el desarrollo de las baterías<sup>36,37</sup>.

El grafeno, por otro lado, también puede utilizarse para fabricar baterías energéticamente más eficientes que las baterías de iones de litio<sup>38</sup>.

## ¿Cuál es el costo-beneficio?

Como se mencionó anteriormente, la adopción de los nanomateriales en la industria automotriz impacta en los costos de los automóviles.

Se requiere de una gran inversión para incorporar los nanomateriales en los procesos de fabricación de un automóvil, sin embargo, para su fabricación es posible obtener un beneficio importante de esta inversión, ya que los materiales son más económicos, tienen un mejor desempeño y ciclos de vida más largos. Estas características los hacen más rentables para su aplicación definitiva<sup>39</sup>.

## El futuro...

El control electrónico de los diferentes componentes del vehículo es uno de los aspectos cambiantes en los automóviles modernos. Los nanomateriales pueden utilizarse para desarrollar todos los subsistemas del automóvil, tales como elementos conductivos, neumáticos, revestimientos antirreflejantes para pantallas y retrovisores, polímeros y metales reforzados, ad-

hesivos, lubricantes y el mejoramiento de baterías, solo por mencionar algunos. Los automóviles también necesitan adecuar o mejorar los sensores de movimiento, radar y temperatura para detectar personas, animales y objetos en su trayecto, aumentando su seguridad y autonomía.

Otro factor por considerar es que los nanomateriales deben incluirse en un marco regulatorio más estricto. Aunque existen leyes que controlan su uso<sup>40</sup>, es importante seguir evaluando las consecuencias y límites de aplicabilidad (sobre todo para proteger a los usuarios del impacto a la salud que causa estar expuesto a ellos, así como los impactos al medio ambiente). Todo esto con la finalidad de satisfacer la creciente demanda que hay sobre vehículos modernos, seguros y duraderos [Figura 4].

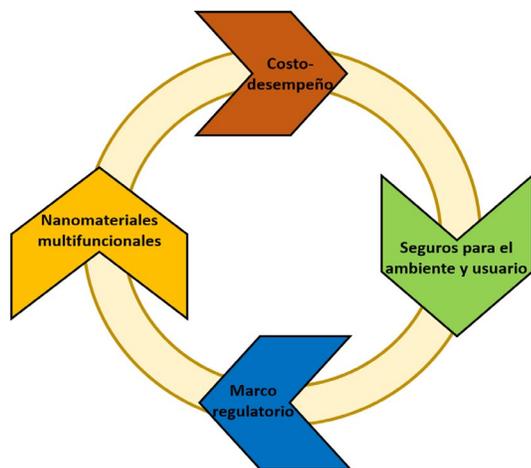


Figura 4. Factores a considerar para las aplicaciones de los nanomateriales en el campo automotriz

## Conclusión

En este artículo se mencionaron, de manera general, algunos usos que tienen los nanomateriales para mejorar las partes que conforman a los automóviles y la revolución que están generando en esta industria (en la que han encontrado un lugar importante). Sus aplicaciones en los automóviles, des-

de el motor, la carrocería, los neumáticos y los diferentes componentes exteriores e interiores, impactan directamente en su eficiencia, durabilidad y seguridad, pero también en el beneficio económico que trae su implementación (aunado al desarrollo de vehículos eléctricos y más modernos).

La utilización de los nanomateriales en la industria automotriz presenta aún muchos retos, desde su investigación hasta la implementación. Se tratan de nuevos materiales que todavía falta explorar a profundidad, pero que ya están abriendo el camino hacia una nueva era de automóviles.

## Referencias

1. M. Quintili. "Nanociencia y Nanotecnología... un mundo pequeño". Cuadernos Del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación (2019). <https://doi.org/10.18682/cdc.v42i42.1430>.
2. N. Baig, I. Kammakakam, W. Falath. "Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges". *Materials Advances*, 2(2021), 1821–1871. <https://doi.org/10.1039/d0ma00807a>.
3. V. Dhinakaran, M.V. Shree. "The Role and Applications of Nanomaterials in the Automotive Industry". *Nanomaterials and Nanocomposites* (2021), 51–59. <https://doi.org/10.1201/9781003160946-5>.
4. M. Mansoor, M. Shahid. "Carbon nanotube-reinforced aluminum composite produced by induction melting". *Journal of Applied Research and Technology* 14(2016), 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.05.002>.
5. L. Busse, K. Peter, C.W. Karl, H. Geisler, M. Klüppel. "Reducing friction with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>-nanoparticles in NBR". *Wear* 271(2011), 1066–1071. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.05.017>.
6. W. Li, S. Zheng, B. Cao, S. Ma. "Friction and wear properties of ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> composite nanoparticles". *Journal of Nanoparticle Research* 13(2010), 2129–2137. <https://doi.org/10.1007/s11051-010-9970-x>.
7. M. Kole, T.K. Dey. "Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant". *Experimental Thermal and Fluid Science* 34(2010), 677–683. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.12.009>.
8. S.N.A. Yusof, N.A.C. Sidik, Y. Asako, W. Japar, A.A. Mohd, S.B. Mohamed, N.M. Muhammad. "A comprehensive review of the influences of nanoparticles as a fuel additive in an internal combustion engine (ICE)". *Nanotechnology Reviews* 9(2020), 1326–1349. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0104>.
9. M. Pisarek, P. Kędzierzawski, M. Andrzejczuk, M. Hołdyński, A. Mikołajczuk-Zychora, A. Borodziński, M.

- Janik-Czachor. "TiO<sub>2</sub> Nanotubes with Pt and Pd Nanoparticles as Catalysts for Electro-Oxidation of Formic Acid". *Materials* 13(2020), 195. <https://doi.org/10.3390/ma13051195>.
10. N. Stafford. "Catalytic converters go nano". *Chemistry World* (2007).
11. F. Uddin. "Effects of Clay in Nylon Fibe". *Journal of Physics: Conference Series*, 2160(2022), 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2160/1/012002>
12. F. Valentini, A. Pegoretti. "End-of-life options of tyres. A review". *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 5(2022), 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.08.006>.
13. D. Bakošová, A. Bakošová. "Testing of Rubber Composites Reinforced with Carbon Nanotubes". *Polymers* 14(2022), 3039. <https://doi.org/10.3390/polym14153039>.
14. A.N. Alkhazraji. "Enhancement of Mechanical Properties and Handling Characteristic of Tire Rubber Using Different Percentage of Nano Aluminum Oxide and Carbon Black". *International Journal of Nanoelectronics and Materials* 11(2018), 263–270.
15. S.R. Adarmanabadi, M. Jafari, S.M.H. Farrash, M. Heidari. "Effect of nano clay, nano-graphene oxide and carbon nanotubes on the mechanical and tribological properties of crosslinked epoxy nanocomposite". *PLOS ONE* 16(2021). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259401>.
16. S.W. Choi, H.S. Cho, C.S. Kang, S. Kumai. "Precipitation dependence of thermal properties for Al–Si–Mg–Cu–(Ti) alloy with various heat treatment". *Journal of Alloys and Compounds* 16(2015), 1091–1097. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.201>.
17. P. Luque, D.A. Mántaras, A. Maradona, J. Rocés, L. Sánchez, L. Castejón, H. Malón. "Multi-Objective Evolutionary Design of an Electric Vehicle Chassis". *Sensors* 20(2020). <https://doi.org/10.3390/s20133633>.
18. S.K. Tiwari, S. Sahoo, N. Wang, A. Huczko. "Graphene research and their outputs: Status and prospect". *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* 5(2020),10–29. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2020.01.006>.
19. R. Goyal, M. Sharma, U. Kumar Amberiya. "Innovative Nano Composite Materials and Applications in Automobiles". *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(2014), 3001–3009. <https://doi.org/10.17577/IJERTV3IS10695>
20. M.N. de Queiroz, A.M. de Oliveira Lima, M.E.G. Winkler, V.H. Fragal, A.F. Rubira, T. Sequinel, L. da Silva Ribeiro, F. Nunes de Souza Neto, E. Rodrigues Camargo, M. Z. Ferreira Arlindo, C. Saraiva Ogradowski, L. Fernando Gorup. "Conductive nanopaints: A remarkable coating". *Nanotechnology in the Automotive Industry* (2022), 429–49. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90524-4.00020-7>.
21. M. Shafique, X. Luo. "Nanotechnology in Transportation Vehicles: An Overview of Its Applications, Environmental, Health and Safety Concerns". *Materials* 12(2019). <https://doi.org/10.3390/ma12152493>.
22. E. Azmy, M.R.Z. Al-kholy, A.M. Al-Thobity, M.M. Gad, M.A. Helal. "Comparative Effect of Incorporation of ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, and SiO<sub>2</sub> Nanoparticles on the Strength and Surface Properties of PMMA Denture Base Material: An In Vitro Study". *International Journal of Biomaterials* 2022(2022), 1–10. <https://doi.org/10.1155/2022/5856545>.
23. S.M. Simon, A. Chandran, G. George, M.S. Sajna, P. Valparambil, E. Kumi-Barmiah, G. Jose, P. R. Biju, C. Joseph, N. V. Unnikrishnan. "Development of Thick Superhydrophilic TiO<sub>2</sub>–ZrO<sub>2</sub> Transparent Coatings Realized through the Inclusion of Poly(methyl methacrylate) and Pluronic-F127". *ACS Omega* 3(2018), 14924–14932. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01940>.
24. Y. Dahman, N. Niznik, N. Sadyathan. "Electronic and Electro-Optic Nanotechnology". *Nanotechnology and Functional Materials for Engineers* (2017) 191–206. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-51256-5.00009-5>
25. H. Shaban. "Volkswagen used weather cannons at a plant in Mexico to protect cars from hail. Farmers say the devices caused a drought". *The Washington Post* (2018). <https://www.washingtonpost.com/technology/2018/08/24/volkswagen-used-weather-cannons-plant-mexico-protect-cars-hail-farmers-say-devices-caused-drought/>
26. A. Law. "Mercedes-Benz Nano-Paint". *Auto123.Com* (2003). <https://www.auto123.com/en/news/mercedes-benz-nano-paint/46895/>
27. O. Hossain, E. Rahman, H. Roy, M.D.S Azam, S. Ahmed. "Synthesis, characterization, and comparative assessment of antimicrobial properties and cytotoxicity of graphene-, silver-, and zinc-based nanomaterials". *Analytical Science Advances* 3(2021), 54–63. <https://doi.org/10.1002/ansa.202100041>.
28. M. Guerrero Correa, F.B. Martínez, C.P. Vidal, C. Streitt, J. Escrig, C.L. de Dicastillo. "Antimicrobial metal-based nanoparticles: a review on their synthesis, types and antimicrobial action". *Beilstein Journal of Nanotechnology* 11(2020), 1450–1469. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.129>.
29. D.S. de Almeida, L.D. Martins, M.L. Aguiar. "Air pollution control for indoor environments using nanofiber filters: A brief review and post-pandemic perspectives". *Chemical Engineering Journal Advances* 11(2022). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100330>.
30. C. Mullins-Jaime, T.D. Smith. "Nanotechnology in Residential Building Materials for Better Fire Protection and Life Safety Outcomes". *Fire* 5(2022). <https://doi.org/10.3390/fire5060174>.
31. J. Mathew, J. Joy, S.C. George. "Potential applications of nanotechnology in transportation: A review". *Journal of King Saud University - Science* 31(2019), 586–594. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.03.015>.
32. S.J. Pearton, F. Ren. "Advances in ZnO-based materials for light emitting diodes". *Current Opinion in Chemical Engineering* 3(2014), 51–55. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2013.11.002>.
33. E.F. Schubert, T. Gessmann. "Light Emitting Diodes". *Encyclopedia of Condensed Matter Physics* (2005), 102–111. <https://doi.org/10.1016/b0-12-369401-9/00498-8>.
34. C.J. Zollner, S.P. DenBaars, J.S. Speck, S. Nakamura. "Germicidal ultraviolet LEDs: a review of applications and semiconductor technologies". *Semiconductor Science and Technology* 36(2021). <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ac27e7>.
35. W.J. Requia, M. Mohamed, C.D. Higgins, A. Arain, M. Ferguson. "How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health".

Atmospheric Environment 185(2018), 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.040>.

36. F. Cesano, M.J. Uddin, K. Lozano, M. Zanetti, D. Scarno. "All-Carbon Conductors for Electronic and Electrical Wiring Applications". *Frontiers in Materials* 7(2020). <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00219>.

37. R. Maheswaran, B.P. Shanmugavel. "A Critical Review of the Role of Carbon Nanotubes in the Progress of Next-Generation Electronic Applications". *Journal of Electronic Materials* 51(2022), 2786–2800. <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09516-8>.

38. A. Ali, F. Liang, J. Zhu, P.K. Shen. "The role of graphene in rechargeable lithium batteries: Synthesis, functionalisation, and perspectives". *Nano Materials Science* (2022). <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2022.07.004>.

39. N.U.M. Nizam, M.M. Hanafiah, K.S. Woon. "A Content Review of Life Cycle Assessment of Nanomaterials: Current Practices, Challenges, and Future Prospects". *Nanomaterials* 11(2021). <https://doi.org/10.3390/nano11123324>.

40. <https://www.epa.gov/reviewing-new-chemicals-under-toxic-substances-control-act-tsca/control-nanoscale-materials-under>.