



Получено: 26.12.2022 г. | Принято: 30.12.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.1.30.40>

Научная статья

ОБЗОР ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ НАНОЧАСТИЦ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Е.С.Шитова¹, вед. эксп., ORCID: 0000-0002-9085-4813 / esshitova@bochvar.ru

Ф.В.Макаров¹, д.т.н., гл. эксп., ORCID: 0000-0002-5713-2974

А.А.Перцев¹, к.т.н., перв. зам. ген. дир., ORCID: 0000-0001-7452-8228

А.П.Пономаренко¹, нач. управления, ORCID: 0000-0003-0220-1597

А.А.Штраус¹, спец., ORCID: 0000-0003-0020-1454

Аннотация. С учетом развития нанотехнологий в России и мире авторами был проведен анализ перспективных направлений применения наночастиц в различных сферах, таких как медицина, энергетика, электроника и других отраслях промышленности.

Ключевые слова: наночастицы, нанотехнологии, применение наночастиц

Для цитирования: Е.С. Шитова, Ф.В. Макаров, А.А. Перцев, А.П. Пономаренко, А.А. Штраус. Обзор перспективных применений наночастиц в различных отраслях промышленности. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 1. С. 30–40. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.1.30.40>

Received: 26.12.2022 | Accepted: 30.12.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.1.30.40>

Original paper

REVIEW OF THE PROMISING APPLICATIONS OF NANOPARTICLES IN VARIOUS INDUSTRIES

E.S.Shitova¹, Leading Expert, ORCID: 0000-0002-9085-4813 / esshitova@bochvar.ru

F.V.Makarov¹, Doctor of Sci. (Tech), Chief Expert, ORCID: 0000-0002-5713-2974

A.A.Pertsev¹, Cand. of Sci. (Tech), Deputy Director, ORCID: 0000-0001-7452-8228

A.P.Ponomarenko¹, Head of Department, ORCID: 0000-0003-0220-1597

A.A.Shtraus¹, Specialist, ORCID: 0000-0003-0020-1454

Abstract. The authors analysed the promising applications of nanoparticles in various fields, such as medicine, energy production, electronics and other industries taking into account the development of nanotechnology in Russia and worldwide.

Keywords: nanoparticles, nanotechnologies, application of nanoparticles

For citation: E.S. Shitova, F.V. Makarov, A.A. Pertsev, A.P. Ponomarenko, A.A. Shtraus. Review of the promising applications of nanoparticles in various industries. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 1. PP. 30–40. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.1.30.40>

¹ АО "ВНИИНМ", Москва, Россия / JSC VNIINM, Moscow, Russia



ВВЕДЕНИЕ

Нанотехнологии остаются одним из передовых направлений исследований современного материаловедения. Согласно общепринятому определению, к нанотехнологиям относится область научных и прикладных исследований по манипуляции объектами, хотя бы один линейный размер которых находится в диапазоне от 1 до 100 нм. К таким объектам можно отнести тонкие пленки, нанопористые структуры, нанотрубки и нановолокна, нанодисперсии, наночастицы и т.д. Значительный интерес к ним обусловлен возможностью достижения определенных свойств для целого ряда применений, недостижимых для классических материалов. Например, наночастицы обладают уникальными свойствами по сравнению с объемными материалами, основанными на таких особенностях, как размер (в том числе и отношение площади поверхности к объему), морфология. К этим свойствам можно отнести химическую активность, поглощение энергии, биологическую активность, электронные, оптические, механические и магнитные свойства.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обзор литературы был проведен с использованием баз данных Scopus, РИНЦ, Google.Scholar, Espacenet и др. и включает в себя анализ данных, посвященных применению наночастиц в период с 2005 по 2022 год.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Современный уровень техники предъявляет повышенные требования к свойствам и характеристикам материалов, которые не всегда могут быть обеспечены за счет использования традиционных материалов. Именно этим объясняется повышенный интерес к нанотехнологиям во всем мире. С каждым годом открываются новые свойства и, как следствие, новые возможности применения наноматериалов в различных отраслях промышленности. В данной работе рассмотрены направления, которые имеют перспективы промышленного внедрения в ближайшие годы или уже применяются.

Медицина

Одной из наиболее перспективных и быстро развивающихся отраслей применения наночастиц являются различные направления медицины. Использование нанотехнологий в медицине открывает новые возможности. Некоторые методы на данный момент только разрабатываются, в то время как другие находятся

INTRODUCTION

Nanotechnology remains one of the innovative fields of research in modern materials science. According to a commonly accepted definition, nanotechnology refers to the field of scientific and applied research in manipulation of objects with at least one linear dimension in the range from 1 to 100 nm. Such objects include thin films, nanoporous structures, nanotubes and nanofibres, nanodispersions, nanoparticles, etc. Intense interest in them is conditioned by a possibility of achieving certain properties for a range of applications that are unattainable for classical materials. For example, nanoparticles have unique properties compared to bulk materials, based on such features as size (including surface area to volume ratio) and morphology. These properties include chemical activity, energy absorption, biological activity, electronic, optical, mechanical and magnetic properties.

RESEARCH METHODS

The literature review was conducted using Scopus, RSCI, Google.Scholar, Espacenet and other databases, and includes an analysis of data on nanoparticle applications from 2005 to 2022.

RESULTS AND DISCUSSION

The current state of art increased demands on the properties and characteristics of materials which cannot always be achieved by using traditional materials. This fact explains the increased interest in nanotechnology worldwide. Every year new properties and, as a consequence, new opportunities for the use of nanomaterials in various industries are discovered. In this paper, we consider areas that have prospects for industrial implementation in the coming years or are already in use.

Medicine

One of the most promising and fastest-growing applications of nanoparticles is in various fields of medicine. The use of nanotechnology in medicine opens up new possibilities. Some methods are currently under development while others are in clinical trials or are already in use. In medicine, the characteristics of nanoparticles are usually subject to particularly stringent requirements.

The main application of nanotechnology in medicine, which is currently being actively developed, involves the use of nanoparticles to deliver drugs to certain types of cells (e.g. cancer cells). Polymer-modified metal nanoparticles, such as cobalt oxide nanoparticles coated with chitosan or modified with addition of N-phosphonomethylimino diacetic acid, are used for this purpose. These nanoparticles



на стадии клинических испытаний или уже применяются. В медицине обычно применяются особо жесткие требования к характеристикам наночастиц.

Основное применение нанотехнологий в медицине, которое в настоящий момент активно развивается, включает использование наночастиц для доставки лекарств к определенным типам клеток (например, к раковым клеткам). Для этого используются наночастицы металлов, модифицированные полимерами, например, наночастицы оксида кобальта, покрытые хитозаном или модифицированные добавлением N-фосфонометилиминодиуксусной кислоты. Эти наночастицы сконструированы таким образом, что они притягиваются к больным клеткам, не затрагивая здоровые. Наночастицами некоторых металлов, таких как титан, ванадий, хром, рений, золото, медь и др., производят термолиз раковых опухолей, используя при обработке лазерное излучение, которое не поглощается тканями человека, при этом происходит нагрев наночастиц и термическое воздействие на раковые клетки [1-10].

Антимикробные свойства элементов применяются и в биомедицине. Так, например, наночастицы серебра используют при разработке перевязочных материалов нового поколения, препаратов для обеззараживания ран, также доказана возможность проникновения наночастиц серебра сквозь мембрану бактерий с дальнейшим некрозом этих клеток [3, 4, 9, 11-18].

Наиболее распространенное применение наночастиц в медицине связано с диагностикой методами магнитно-резонансной томографии (МРТ) и (КТ). Первое поколение экзогенных контрастных веществ состояло из высокоспиновых парамагнитных ионов металлов, таких как марганец (Mn^{2+}), железо (Fe^{3+}) или гадолиний (Gd^{3+}). Ведутся исследования относительно применений наночастиц оксида золота и железа ($Au-Fe_3O_4$), наночастиц ионов металлов, пористых полых наночастиц Fe_3O_4 и наночастиц сплавов на основе железа, таких как железо-кобальт ($FeCo$) и железо-платиновые ($FePt$) наночастицы [8, 10, 19-22]. В России на данный момент для проведения МРТ используются только препараты на основе гадолиния, так как только они сертифицированы, однако эти препараты имеют ряд побочных действий и за рубежом постепенно отказываются от их применения [23, 24].

Перспективными областями являются также хирургия и стоматология, где биокерамические наночастицы, такие как фосфат кальция, нитрид бора, оксид цинка и др., применяются

are designed in such way that they are attracted to diseased cells without affecting healthy cells. Some metal nanoparticles, such as titanium, vanadium, chromium, rhenium, gold, copper, etc., are used to perform thermolysis of cancerous tumours using laser radiation that is not absorbed by human tissue while heating the nanoparticles and thermally affecting cancer cells [1-10].

The antimicrobial properties of elements are also used in biomedicine. For example, silver nanoparticles are used in development of new generation dressings, wound disinfection preparations, also a possibility of silver nanoparticle penetration through the membrane of bacteria with further necrosis of these cells has also been proved [3, 4, 9, 11-18].

The most common application of nanoparticles in medicine relates to diagnostics by magnetic resonance imaging (MRI) and (CT). The first generation of exogenous contrast agents consisted of high-spin paramagnetic ions of metals such as manganese (Mn^{2+}), iron (Fe^{3+}) or gadolinium (Gd^{3+}). Research is ongoing regarding the applications of gold and iron oxide nanoparticles ($Au-Fe_3O_4$), metal ion nanoparticles, porous hollow Fe_3O_4 nanoparticles and iron-based alloy nanoparticles such as iron-cobalt ($FeCo$) and iron-platinum ($FePt$) nanoparticles [8, 10, 19-22]. In Russia, only gadolinium-based drugs are currently used for MRI because they are the only ones certified, but these drugs have a number of side-effects and are being phased out abroad [23, 24].

Promising areas are also surgery and dentistry, where bioceramic nanoparticles such as calcium phosphate, boron nitride, zinc oxide, etc., are used for production of implants, as well as in bone and tissue regeneration [11, 25-27]. In this case, particular attention is paid to the toxicological characteristics of materials and possibility of making implants that provide long-term treatment by the gradual release of drugs, such as antibiotics, into the body.

Nanoparticles of titanium oxide, zinc oxide and silver oxide are known to be used in cosmetic and dermatological preparations, such as healing creams (to treat scars, acne) and sunscreens [28-30].

When it comes to introducing new technologies, medicine is the most complex sector, due to the high risks involved; a lot of research is carried out and the materials used have to be strictly compliant. Unlike other sectors, medicine does not require as much material as current nanoparticle technology can provide.

The medical applications of nanoparticles are shown in Fig.1.

для производства имплантов, а также при регенерации костей и тканей [11, 25–27]. В данном случае, особое внимание уделяется токсикологическим характеристикам материалов и возможности изготовления имплантов, обеспечивающих длительное лечение за счет постепенного высвобождения лекарственных препаратов, например антибиотиков, в организм.

Известны применения наночастиц оксида титана, оксида цинка и серебра в косметических и дерматологических препаратах, таких как заживляющие крема (для лечения шрамов, акне), солнцезащитные крема [28–30].

В части внедрения новых технологий медицина является самой сложной отраслью, ввиду высокого риска проводится много исследований, а используемые материалы должны строго соответствовать требованиям. В отличие от других отраслей, медицине требуются не такие большие объемы материала, которые могут быть обеспечены нынешними технологиями получения наночастиц.

Направления применения наночастиц в области медицины изображены на рис.1.

Энергетика

В последние годы в мире существует тренд на постепенный переход к альтернативной энергетике, а получение высоких показателей эффективности невозможно без использования современных технологий. Нанотехнологии позволяют решить проблемы, которые препятствовали развитию альтернативной энергетике, в том числе и снизить себестоимость получаемой электроэнергии.

В водородной энергетике наночастицы используются сразу в нескольких направлениях: фотоэлектрохимическое разложение воды, фотокаталитическое получение водорода, твердотельное хранение водорода и топливные элементы с протоннообменной мембраной. Оксиды титана и цинка являются полупроводниками с широкой запрещенной зоной и используются в качестве фотоанода для разложения воды [31]. Для получения водорода часто используется алюминий, который образует оксиды, соединяясь с кислородом из воды, высвобождая при этом водород. При этом площадь поверхности алюминия играет значимую роль и применение наночастиц алюминия может повысить эффективность этих процессов [32–34].

Одно из уникальных свойств наночастиц обеспечивается отношением большой площадью поверхности к объему, что делает их перспективными для применения в качестве катализаторов.

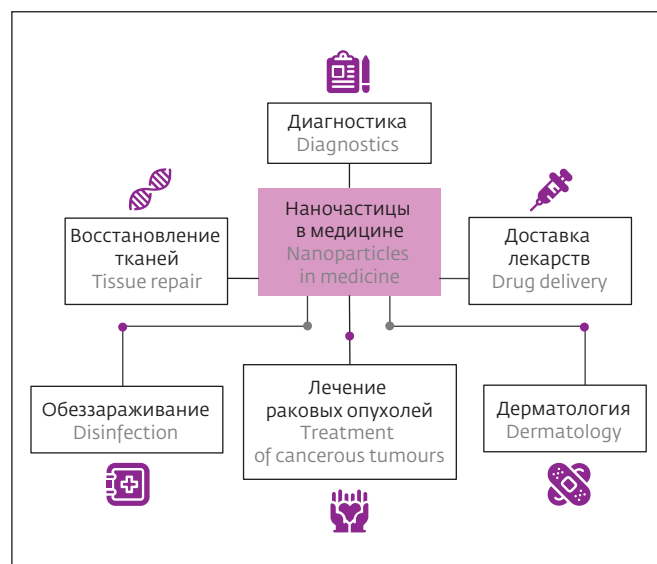


Рис.1. Области применения наночастиц в медицине
Fig.1. Applications of nanoparticles in medicine

Energy production

In recent years, there is a trend towards a gradual transition to alternative energy sources however here achievement of high efficiency levels is impossible without the use of modern technology. Nanotechnology will solve the problems that have hindered development of alternative energy, including reducing the cost of electricity produced.

In hydrogen energy, nanoparticles are used in several applications: photoelectrochemical water decomposition, photocatalytic hydrogen production, solid-state hydrogen storage and proton exchange membrane fuel cells. Titanium and zinc oxides are wide bandgap semiconductors which are used as photoanodes for water decomposition [31]. To produce hydrogen, aluminium is often used to form oxides by combining with oxygen from water, releasing hydrogen in the process. At the same time, the surface area of aluminium plays a significant role and the use of aluminium nanoparticles can increase efficiency of these processes [32–34].

One of the unique properties of nanoparticles is provided by their large surface area to volume ratio, which makes them promising for use as catalysts. For example, efficiency of platinum and palladium based catalysts [42], suitable for use in fuel cells, is significantly increased by the use of nanoparticles. The degradation rate of such catalysts is 7–8 times lower than that of conventional ones [35]. Other promising catalysts are tungsten, vanadium, cerium, copper, zinc and titanium oxides, etc. [36–42].

Nowadays, the main ways of storing and transporting hydrogen are liquefaction and compression



Так, например, эффективность катализатора на основе платины и палладия [42], пригодного для использования в топливных элементах, при применении наночастиц значительно увеличивается. Скорость деградации таких катализаторов в 7–8 раз меньше, чем традиционных [35]. Другими перспективными катализаторами являются вольфрам, ванадий, церий, медь, оксиды цинка и титана и др. [36–42].

На сегодняшний день основными способами хранения и транспортировки водорода являются сжижение и сжатие в газообразном состоянии. Развитие водородной энергетики требует новых безопасных и более дешевых способов, одним из которых может быть синтез наночастиц с развитой поверхностью. В первую очередь интерес представляет магний из-за своей распространенности, а также многокомпонентные аэрогели на его основе [31, 43, 44].

Одной из проблем солнечной энергетики является загрязнение поверхностей, что снижает эффективность солнечных элементов. В 2012 году была выпущена серия панелей, в которых используются самоочищающиеся стекла с нанопокрываниями [45]. Кроме того, различные наночастицы используются в качестве высокопроизводительных полупроводников *n*- и *p*-типа, а также в качестве замены органических красителей, что также влияет на выход энергии солнечных элементов [46–51].

В традиционной углеводородной энергетике тоже есть место наночастицам. Так, например, использование жидкостей с наночастицами (коллоидов) позволяет повысить извлекаемость нефти из породы. Обычно для повышения нефтеотдачи используют химическое, термическое или полимерное заводнение, однако разложение полимеров и поверхностно-активных веществ влечет дополнительные затраты и нагрузку на экологию. Перспективным методом повышения нефтеотдачи являются наночастицы оксидов магния, алюминия, цинка, циркония, олова, железа, никеля, гидрофобного оксида кремния и оксида кремния, обработанного силаном, прежде всего за счет изменения смачиваемости, улучшения подвижности захваченной нефти, усиления консолидации песков и снижения межфазного натяжения [52, 53].

Направления применения наночастиц в области энергетики изображены на рис.2.

Электроника

Одно из первых промышленных применений наночастиц в электронике – пасты для припоя, такие припои отличаются высокой прочностью,

in gaseous state. The development of hydrogen energy requires new safer and cheaper methods, one of them could be nanoparticles due to their surface area. First of all, magnesium is of interest because of its prevalence, as well as of the multi-component aerogels based on it [31, 43, 44].

One of the problems of solar energy is surface dusting, which reduces efficiency of solar cells. In 2012, a series of panels were released that use self-cleaning glass with nanocoatings [45]. In addition, various nanoparticles are used as high-performance *n*- and *p*-type semiconductors and as a substitute for organic dyes, which also affects the energy yield of solar cells [46–51].

There is also a place for nanoparticles in the conventional hydrocarbon energy. For example, the use of fluids with nanoparticles (colloids) can increase recoverability of oil from rocks. Chemical, thermal or polymer flooding is generally used to enhance oil recovery but degradation of polymers and surfactants entails additional costs and burdens on the environment. Nanoparticles of magnesium, aluminum, zinc, zirconium, tin, iron, nickel, hydrophobic silicon oxide and silane-treated silicon oxide are promising methods of enhanced oil recovery, primarily by changing wettability, improving mobility of trapped oil, enhancing sand consolidation and reducing interfacial tension [52, 53].

The energy production applications of nanoparticles are presented in Fig.2.

Electronics

One of the first industrial applications of nanoparticles in electronics is in solder pastes, such solders have high strength, wear resistance and heat resistance due to their intermetallic composition [54].

Some metal oxides have the properties of semiconductors with tunable bandgap width, their films are of great interest for micro- and optoelectronics, and solar cells [55]. Other oxides, such as zirconium dioxide, exhibit dielectric properties and can be used as an insulator in transistors [56].

A number of works indicate the promising use of silicon nanoparticles [57] and tin [58] in lithium-ion batteries to increase the reversible power up to 360%, compared with traditional graphite batteries, with the particle size having a direct influence on the battery lifetime. There are also ongoing works on the use of vanadium oxide nanoparticles as the cathode for lithium-ion batteries [38], tin oxide [58] for sodium and potassium-ion batteries and manganese oxide in lithium-ion batteries [59].

The use of nanoparticles as detection elements can greatly increase their sensitivity. Due to their small size, such detectors need only a few molecules to

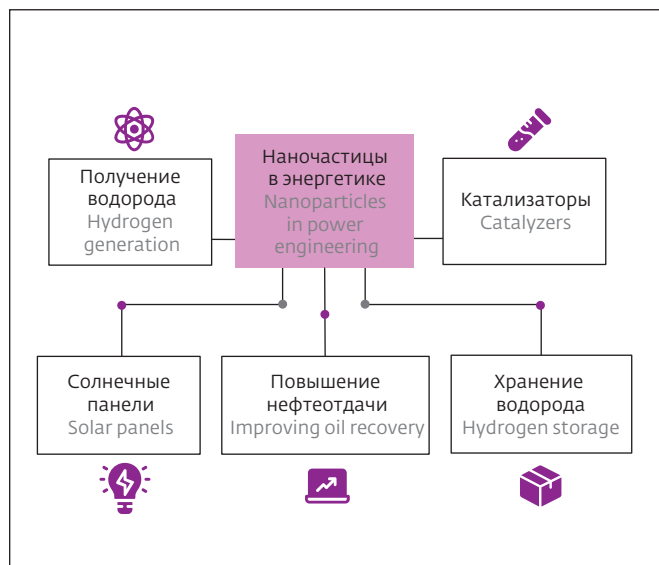


Рис.2. Области применения наночастиц в энергетике
Fig.2. Applications of nanoparticles in the energy sector



Рис.3. Области применения наночастиц в электронике
Fig.3. Applications of nanoparticles in electronics

износостойкостью и термостойкостью за счет интерметаллидов в составе [54].

Некоторые оксиды металлов имеют свойства полупроводников с перестраиваемой шириной запрещенной зоны, их пленки представляют большой интерес для микро- и оптоэлектроники, солнечных элементов [55]. Другие оксиды, например диоксида циркония, проявляют диэлектрические свойства и могут быть использованы в качестве изолятора в транзисторах [56].

Ряд работ свидетельствует о перспективности применения в литий-ионных аккумуляторах наночастиц кремния [57] и олова [58] для увеличения реверсивной мощности до 360%, по сравнению с традиционными графитовыми, причем размер частиц оказывает непосредственное влияние на стойкость аккумуляторов. Также ведутся работы по применению наночастиц оксидов ванадия в качестве катода литий-ионных аккумуляторов [38], оксида олова [58] для натрий- и калий-ионных, оксидов марганца в литий-ионных аккумуляторах [59].

Применение наночастиц в качестве детектирующих элементов может значительно повысить их чувствительность. За счет малого размера таким детекторам достаточно несколько молекул для изменения своих электрических характеристик, таких как емкость или сопротивление. Для обнаружения используются различные металлы, такие как золото, платина, палладий, серебро, медь, кобальт и др., включая редкоземельные металлы. Датчики и сенсоры на наночастицах могут применяться для обнаружения

change their electrical characteristics such as capacitance or resistance. Various metals such as gold, platinum, palladium, silver, copper, cobalt and others, including rare earth metals, are used for detection. Sensors and transducers based on nanoparticles can be used for gas leak detection, anti-terrorism purposes as well as for analysis of water, air, soil and even food quality [60, 61].

The fields of application of nanoparticles in electronics are shown in Fig.3.

Industry

There are many industries in which nanoparticles are used. In this section we consider applications of nanoparticles in products for such industries as aviation, shipbuilding, mechanical engineering, metallurgy, agriculture, parts and assemblies for energy and electronics industries described above, and many others.

Another important difference between nanoparticles and bulk material must not be forgotten, the change in thermodynamic characteristics – the melting point depends on the particle size. Due to the large number of atoms near the surface of the particle, the Debye temperature differs significantly. These properties are of great interest in such processes as sintering and mechanoactivation [62].

Nanoparticles are used to fabricate ceramic, matrix and polymer-matrix composites [63, 64]. Aluminum and yttrium oxides are applied to make optical elements whose characteristics cannot be obtained by other methods [65]. Metal matrix composites produced using nanoparticles as alloying elements



утечек газа, в антитеррористических целях, а также для анализа качества воды, воздуха, почв и даже качества пищевых продуктов [60, 61].

Направления применения наночастиц в электронике изображены на рис.3.

Промышленность

Очень много можно перечислять отраслей промышленности, в которых применение наночастиц имеет место. В данном разделе рассмотрены направления применения наночастиц в изделиях для таких отраслей, как авиа-, судостроение, машиностроение, металлургия, сельское хозяйство, детали и узлы для описанных выше энергетики и электроники и многих других.

Нельзя забывать еще об одном важном отличии наночастиц от объемного материала, изменении термодинамических характеристик – температура плавления зависит от размера частиц. В связи с большим количеством атомов вблизи поверхности частицы, температура Дебая существенно отличается. Наибольший интерес эти свойства представляют в таких процессах, как спекание и механоактивация [62].

Наночастицы используются для создания керамических, металломатричных и полимерно-матричных композитных материалов [63, 64]. Оксиды алюминия и иттрия используются для создания оптических элементов, характеристики которых невозможно получить другими методами [65]. Металломатричные композиты, полученные с использованием наночастиц в качестве легирующих элементов, демонстрируют рабочие характеристики, которые превышают в несколько раз характеристики объемных материалов. В качестве матрицы в основном используются сплавы алюминия, меди, титана, магния, а упрочняющими частицами выступают оксиды, нитриды и карбиды различных металлов [66–69]. Так, например, испытания на растяжения образцов из обычного сплава AZ91D и с добавлением 1% об. наночастиц нитрида алюминия показали повышение механических свойств на 44% [69]. Наночастицы молибдена применяются для создания таких ответственных элементов, как рентгеновские трубки, вакуумные клапаны [67].

Наночастицы нашли широкое применение в покрытиях [36, 63]. В первую очередь, для создания гидрофобных поверхностей, которые являются самоочищающимися. Наночастицы оксида титана, кремния, циркония и цинка, например, используются для покрытия корпусов судов во избежание нарастания микроорганизмов и, как следствие, снижения количества простоев [70].

exhibit performance characteristics that are several times higher than those of bulk materials. The matrix materials used are mainly alloys of aluminium, copper, titanium, magnesium, while the strengthening particles are oxides, nitrides and carbides of various metals [66–69]. For example, tensile tests of specimens made of conventional AZ91D alloy and with the addition of 1% vol. aluminum nitride nanoparticles showed an increase in mechanical properties by 44% [69]. Molybdenum nanoparticles are used for development of such critical elements as X-ray tubes and vacuum valves [67].

Nanoparticles have found wide application in coatings [36, 63] primarily to fabricate self-cleaning hydrophobic surfaces. For example, nanoparticles of titanium oxide, silicon, zirconium and zinc are used to coat ship hulls to avoid microbial fouling and, consequently, reduce downtime [70].

Introduction of nanoparticles into various lubricants helps to improve their tribological properties. In [71] the effect of bismuth nanoparticles on tribological properties of BS900 and BS6500 lubricants was studied. At that, as regards light lubricant, the friction coefficient decreased from 0.091 to 0.052 (at particle concentration of 900 mg/l), for heavy lubricant from 0.074 to 0.047 (310 mg/l).

There are studies confirming the possibility of using silicon nanoparticles for water purification [11, 72] and in agriculture [72, 73], but these methods are not yet widely used.

The fields of application of nanoparticles in industry are shown in Fig.4.

CONCLUSIONS

The analysis of literature has shown that in recent years scientists have been actively working to expand the range of applications of nanoparticles in various industries. It should be noted that the application fields of nanoparticles are not limited to those described, the use of nanoparticles is growing year by year same as the development of their methods of manufacture.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

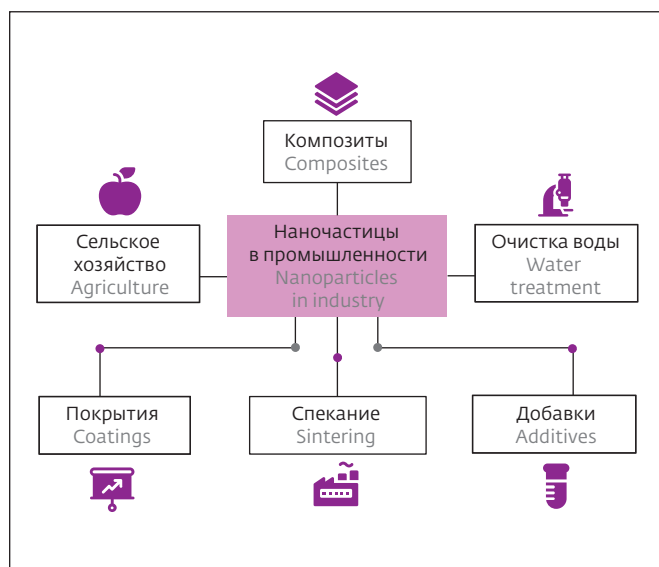


Рис.4. Области применения наночастиц в промышленности
Fig.4. Applications of nanoparticles in industry

Введение в различные масла наночастиц способствует улучшению их трибологических характеристик. В работе [71] исследовалось влияние наночастиц висмута на трибологические свойства масел BS900 и BS6500. При этом для легкого масла коэффициент трения снизился с 0,091 до 0,052 (при концентрации частиц 900 мг/л), для тяжелого – с 0,074 до 0,047 (310 мг/л).

Есть исследования, подтверждающие возможность применения наночастиц кремния для очистки воды [11, 72] и в сельском хозяйстве [72, 73], однако широкого применения эти способы пока не получили.

Направления применения наночастиц в промышленности изображены на рис.4.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ литературы показал, что в последние годы ученые активно работают над расширением спектра применения наночастиц в различных отраслях промышленности. Следует отметить, что направления применения наночастиц не ограничиваются описанными, применение наночастиц ежегодно растет, в том числе с развитием способов их изготовления.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Rudramurthy G.R., Swamy M.K. Potential applications of engineered nanoparticles in medicine and biology: an update // *Journal of Biological Inorganic Chemistry*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2018. Vol. 23, no. 8. PP. 1185–1204.
2. Rzigalinski B.A., Strobl J.S. Cadmium-containing nanoparticles: Perspectives on pharmacology and toxicology of quantum dots // *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2009. Vol. 238, no. 3. PP. 280–288.
3. Rajeshkumar S., Naik P. Synthesis and biomedical applications of Cerium oxide nanoparticles – A Review // *Biotechnology Reports*. Elsevier B.V., 2018. Vol. 17. PP. 1–5.
4. Dhall A., Self W. Cerium oxide nanoparticles: A brief review of their synthesis methods and biomedical applications // *Antioxidants*. MDPI, 2018. Vol. 7, no. 8.
5. Shih C.M., Shieh Y.T., Twu Y.K. Preparation of gold nanopowders and nanoparticles using chitosan suspensions // *Carbohydr Polym*. 2009. Vol. 78, no. 2. PP. 309–315.
6. Dasaiah M. et al. Laser Ablation Synthesized Copper Nanoparticles for Cancer Treatment: An Animal Cell Line Studies Laser Ablation Synthesized Copper Nanoparticles for Cancer Treatment: An Animal Cell Line Studies "Laser Ablation Synthesized Copper Nanoparticles for Cancer Treatment: An Animal Cell Line Studies // *Am J Cancer Pre*. v. 2018. Vol. 6, no. 2. PP. 35–40.
7. Çeşmeli S., Biray Avci C. Application of titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles in cancer therapies // *J. Drug Target*. 2019. Vol. 27, no. 7. PP. 762–766.
8. Ansari S.M. et al. Cobalt nanoparticles for biomedical applications: Facile synthesis, physicochemical characterization, cytotoxicity behavior and biocompatibility // *Appl Surf Sci*. Elsevier B.V., 2017. Vol. 414. PP. 171–187.
9. Brown A.L. et al. Biodistribution and toxicity of micellar platinum nanoparticles in mice via intravenous administration // *Nanomaterials*. MDPI AG, 2018. Vol. 8, no. 6.
10. Cholkar K., Hirani N.D., Natarajan C. Nanotechnology-Based Medical and Biomedical Imaging for Diagnostics // *Emerging Nanotechnologies for Diagnostics, Drug Delivery and Medical Devices*. Elsevier, 2017. PP. 355–374.



11. **Burduşel A.C. et al.** Biomedical applications of silver nanoparticles: An up-to-date overview // *Nanomaterials*. MDPI AG, 2018. Vol. 8, no. 9.
12. **Ramalingam V.** Multifunctionality of gold nanoparticles: Plausible and convincing properties // *Advances in Colloid and Interface Science*. Elsevier B.V., 2019. Vol. 271.
13. **Islan G.A. et al.** Silybin-conjugated gold nanoparticles for antimicrobial chemotherapy against Gram-negative bacteria // *J Drug Deliv Sci Technol*. Editions de Sante, 2019. Vol. 53.
14. **Sakthivel C., Keerthana L., Prabha I.** Current status of platinum based nanoparticles: Physicochemical properties and selected applications - a review // *Johnson Matthey Technology Review*. Johnson Matthey Public Limited Company, 2019. Vol. 63, no. 2. PP. 122-133.
15. **Bai K. et al.** Preparation and antioxidant properties of selenium nanoparticles-loaded chitosan microspheres // *Int J Nanomedicine*. 2017. Vol. 12. PP. 4527-4539.
16. **Lee S.H., Jun B.H.** Silver nanoparticles: Synthesis and application for nanomedicine // *International Journal of Molecular Sciences*. MDPI AG, 2019. Vol. 20, no. 4.
17. **Ebrahimi K., Shiravand S., Mahmoudvand H.** Biosynthesis of copper nanoparticles using aqueous extract of Capparis spinosa fruit and investigation of its antibacterial activity // *Marmara Pharm J*. Marmara University, 2017. Vol. 21, no. 4. PP. 866-871.
18. **Alzahrani E., Ahmed R.A.** Synthesis of copper nanoparticles with various sizes and shapes: Application as a superior non-enzymatic sensor and antibacterial agent // *Int J Electrochem Sci*. Electrochemical Science Group, 2016. Vol. 11, no. 6. PP. 4712-4723.
19. **Vallabani N.V.S., Singh S.** Recent advances and future prospects of iron oxide nanoparticles in biomedicine and diagnostics // *3 Biotech*. Springer Verlag, 2018. Vol. 8, no. 6.
20. **Arias L.S. et al.** Iron oxide nanoparticles for biomedical applications: A perspective on synthesis, drugs, antimicrobial activity, and toxicity // *Antibiotics*. MDPI AG, 2018. Vol. 7, no. 2.
21. **Cotin G. et al.** Iron Oxide Nanoparticles for Biomedical Applications: Synthesis, Functionalization, and Application // *Iron Oxide Nanoparticles for Biomedical Applications*. Elsevier, 2018. PP. 43-88.
22. **Huber D.L.** Synthesis, properties, and applications of iron nanoparticles // *Small*. 2005. Vol. 1, no. 5. PP. 482-501.
23. **Yadollahpour A.** Applications of gadolinium nanoparticles in magnetic resonance imaging: a review on recent advances in clinical imaging // *International Journal of Pharmacy & Technology*. 2016. Vol. 8. PP. 11379-11393.
24. **Huang C., Tsourkas A.** Gd-based macromolecules and nanoparticles as magnetic resonance contrast agents for molecular imaging // *Curr Top Med Chem*. NIH Public Access, 2013. Vol. 13, no. 4. P. 411.
25. **Bapat R.A. et al.** An overview of application of silver nanoparticles for biomaterials in dentistry // *Materials Science and Engineering C*. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 91. PP. 881-898.
26. **Covarrubias C., Durán J.P., Maureira M.** Facile synthesis of lithium carbonate nanoparticles with potential properties for bone repair applications // *Mater Lett*. Elsevier B.V., 2018. Vol. 219. PP. 205-208.
27. **Zhang Q., Xiao L., Xiao Y.** Porous Nanomaterials Targeting Autophagy in Bone Regeneration // *Pharmaceutics*. MDPI, 2021. Vol. 13, no. 10.
28. **Raj S. et al.** Nanotechnology in cosmetics: Opportunities and challenges // *J Pharm Bioallied Sci*. Wolters Kluwer - Medknow Publications, 2012. Vol. 4, no. 3. PP. 186.
29. **Chiari-Andréo B.G. et al.** Nanoparticles for cosmetic use and its application // *Nanoparticles in Pharmacotherapy*. William Andrew Publishing, 2019. PP. 113-146.
30. **Effiong D.E. et al.** Nanotechnology in Cosmetics: Basics, Current Trends and Safety Concerns - A Review // *Adv Nanopart. Scientific Research Publishing*, 2019. Vol. 9, no. 1. PP. 1-22.
31. **Mao S.S., Shen S., Guo L.** Nanomaterials for renewable hydrogen production, storage and utilization // *Progress in Natural Science: Materials International*. Elsevier B.V., 2012. Vol. 22, no. 6. PP. 522-534.
32. **Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Egorov I.S.** Effect of electron beam irradiation on the thermal properties of the aluminum nanopowder // *Radiation Physics and Chemistry*. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 153. PP. 156-158.
33. **Bunker C.E., Smith M.J.** Nanoparticles for hydrogen generation // *J Mater Chem*. 2011. Vol. 21, no. 33. PP. 12173-12180.
34. **Kader M.S. et al.** A Novel Method for Generating H₂ by Activation of the μ Al-Water System Using Aluminum Nanoparticles // *Applied Sciences (Switzerland)*. MDPI, 2022. Vol. 12, no. 11. PP. 5378.
35. **Alekseenko A.A. et al.** Durability of de-alloyed PtCu/C electrocatalysts // *Int J Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 43, no. 51. PP. 22885-22895.



36. **Quievryn C., Bernard S., Miele P.** Polyol-based synthesis of praseodymium oxide nanoparticles // *Nanomaterials and Nanotechnology*. InTech Europe, 2014. Vol. 4, no. 1.
37. **Jiang B. et al.** Mesoporous metallic rhodium nanoparticles // *Nat Commun*. Nature Publishing Group, 2017. Vol. 8.
38. **Liu X. et al.** V₂O₅-Based nanomaterials: Synthesis and their applications // *RSC Advances*. Royal Society of Chemistry, 2018. Vol. 8, no. 8. PP. 4014-4031.
39. **Wasmi B. et al.** Synthesis of Vanadium Pentoxide Nanoparticles as Catalysts for the Ozonation of Palm Oil // *Ozone Sci Eng*. Taylor and Francis Inc., 2016. Vol. 38, no. 1. PP. 36-41.
40. **Khan N.T., Jameel N., Review M.** Copper Nanoparticles-Synthesis and Applications // *Acta Scientific Pharmaceutical Sciences*. 2018. Vol. 2. PP. 2581-5423.
41. **Wahyudi S. et al.** Synthesis and Applications of Copper Nanopowder - A Review // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing, 2018. Vol. 395, no. 1.
42. **Tibbetts K.** Laser ablation in liquid: A powerful route to new nanoparticle catalysts // *Research Outreach*. 2019. No. 106. PP. 50-53.
43. **Zhang X. et al.** Synthesis of magnesium nanoparticles with superior hydrogen storage properties by acetylene plasma metal reaction // *Int J Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36, no. 8. PP. 4967-4975.
44. **Makridis S.S. et al.** Polymer-stable magnesium nanocomposites prepared by laser ablation for efficient hydrogen storage // *Int J Hydrogen Energy*. Pergamon, 2013. Vol. 38, no. 26. PP. 11530-11535.
45. **Alanbari M.H. et al.** Nanotechnology applied to renewable energy // *The Online Journal of Science and Technology*. 2019. Vol. 9, no. 4. PP. 244-251.
46. **Avci B., Caglar Y., Caglar M.** Controlling of surface morphology of ZnO nanopowders via precursor material and Al doping // *Mater Sci Semicond Process*. Elsevier Ltd, 2019. Vol. 99. PP. 149-158.
47. **Ozturk T. et al.** An insight into titania nanopowders modifying with manganese ions: A promising route for highly efficient and stable photoelectrochemical solar cells // *Solar Energy*. Elsevier Ltd, 2017. Vol. 157. PP. 47-57.
48. **Chewchinda P. et al.** Preparation of Si nanoparticles by laser ablation in liquid and their appli-



НИ-ТЕХНИ

2023

18-20 апреля

Международная выставка инноваций и конкурс научных разработок

ОТ
ИННО
БАЦИИ

К
РЕДИ
ЗАЦИИ



КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»
Петербургское шоссе, 64



hitech-expo.ru
+7 (965) 771 7751
o.dorokhova@restec.ru

Деловая программа:

- Санкт-Петербургский промышленный конгресс
- Биржа импортозамещения

• Аддитивные технологии • Беспроводные технологии • Биотехнологии: Генная фармакология • Индустриальные информационные технологии • Наноматериалы • Безопасности: Биометрия, датчики, детекторы, электронные анализаторы, системы разв

• Производство • Финансирование разработок, венчурное финансирование • Электронные технологии • Биотехнологии: Генная фармакология • Индустриальные информационные технологии • Наноматериалы • Безопасности: Биометрия, датчики, детекторы, электронные анализаторы, системы разв

• Производство • Финансирование разработок, венчурное финансирование • Электронные технологии • Биотехнологии: Генная фармакология • Индустриальные информационные технологии • Наноматериалы • Безопасности: Биометрия, датчики, детекторы, электронные анализаторы, системы разв

• Производство • Финансирование разработок, венчурное финансирование • Электронные технологии • Биотехнологии: Генная фармакология • Индустриальные информационные технологии • Наноматериалы • Безопасности: Биометрия, датчики, детекторы, электронные анализаторы, системы разв



- cation as photovoltaic material in quantum dot sensitized solar cell // *Journal of Physics: Conference Series*. Institute of Physics Publishing, 2014. Vol. 518, no. 1.
49. **Ma C. et al.** The optical duality of tellurium nanoparticles for broadband solar energy harvesting and efficient photothermal conversion. 2018.
50. **Guisbiers G. et al.** Synthesis of tunable tellurium nanoparticles // *Semicond Sci Technol*. Institute of Physics Publishing, 2017. Vol. 32, no. 4.
51. **Ma C. et al.** The optical duality of tellurium nanoparticles for broadband solar energy harvesting and efficient photothermal conversion // *Sci Adv*. American Association for the Advancement of Science, 2018. Vol. 4, no. 8.
52. **Sircar A. et al.** Applications of nanoparticles in enhanced oil recovery // *Petroleum Research*. KeAi Publishing Communications Ltd., 2022. Vol. 7, no. 1. PP. 77-90.
53. **Cheraghian G., Hendraningrat L.** A review on applications of nanotechnology in the enhanced oil recovery part B: effects of nanoparticles on flooding // *International Nano Letters* 2015 6:1. Springer, 2015. Vol. 6, no. 1. PP. 1-10.
54. **Kotadia H.R. et al.** Limitations of nanoparticle enhanced solder pastes for electronics assembly // 2012 12th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO). IEEE, 2012. PP. 1-5.
55. **Ahmadi M. et al.** Synthesis of Tungsten Oxide Nanoparticles using a Hydrothermal Method at Ambient Pressure.
56. **Keiteb A.S. et al.** Structural and optical properties of zirconia nanoparticles by thermal treatment synthesis // *J. Nanomater.* Hindawi Limited, 2016.
57. **Yin S. et al.** Silicon lithium-ion battery anode with enhanced performance: Multiple effects of silver nanoparticles // *J Mater Sci Technol*. Chinese Society of Metals, 2018. Vol. 34, no. 10. PP. 1902-1911.
58. **Zhao X., Yang Q., Quan Z.** Tin-based nanomaterials: Colloidal synthesis and battery applications // *Chemical Communications*. Royal Society of Chemistry, 2019. Vol. 55, no. 60. PP. 8683-8694.
59. **Hoseinpour V., Ghaemi N.** Green synthesis of manganese nanoparticles: Applications and future perspective-A review // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. Elsevier B.V., 2018. Vol. 189. PP. 234-243.
60. **Abdel-Karim R., Reda Y., Abdel-Fattah A.** Review - Nanostructured Materials-Based Nanosensors // *J Electrochem Soc*. The Electrochemical Society, 2020. Vol. 167, no. 3. P. 037554.
61. **Kumar H. et al.** Applications of nanotechnology in biosensor-based detection of foodborne pathogens // *Sensors* (Switzerland). MDPI AG, 2020. Vol. 20, no. 7.
62. **Анциферова И.В.** Зависимость процесса уплотнения при спекании с использованием наноразмерных металлических порошков (научный обзор) // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*. Машиностроение, материаловедение. 2015. Т. 17. № 2. С. 13-20.
63. **Yasnó J.P., Gunnewiek R.F.K., Kiminami R.H.G.A.** Microwave synthesis of ultrahigh temperature ceramic ZrC nanopowders // *Advanced Powder Technology*. Elsevier B.V., 2019. Vol. 30, no. 7. PP. 1348-1355.
64. **Liu L. et al.** Fabrication of fine-grained undoped Y2O3 transparent ceramic using nitrate pyrogenation synthesized nanopowders // *Ceram Int*. Elsevier Ltd, 2019. Vol. 45, no. 5. PP. 5339-5345.
65. **Liu Q. et al.** Effect of ammonium carbonate to metal ions molar ratio on synthesis and sintering of Nd:YAG nanopowders // *Opt Mater (Amst)*. Elsevier B.V., 2018. Vol. 80. PP. 127-137.
66. **Shin D. et al.** Comparison of different tungsten precursors for preparation of tungsten nanopowder by RF induction thermal plasma // *Int J Refract Metals Hard Mater*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 86.
67. **Feng P., Cao W.** Properties, Application and Synthesis Methods of Nano-Molybdenum Powder // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. Scientific Research Publishing, Inc, 2016. Vol. 04, no. 9. PP. 36-44.
68. **Iban P. et al.** L'université Bordeaux 1 école doctorale des sciences chimiques Influence des nano-particules d'alumine (Al₂O₃) et de diborure de titane (TiB₂) sur la microstructure et les propriétés de l'alliage Al-Si₉-Cu₃-Fe₁ pour des applications de fonderie à haute pression.
69. **Malaki M. et al.** Advanced metal matrix nanocomposites // *Metals* (Basel). MDPI AG, 2019. Vol. 9, no. 3.
70. **Gaur S., Khanna A.S.** Functional Coatings by Incorporating Nanoparticles // *Nano Res Appl*. 2015. Vol. 1, no. 1. P. 1.
71. **Flores-Castañeda M. et al.** Bismuth nanoparticles synthesized by laser ablation in lubricant oils for tribological tests // *J Alloys Compd*. Elsevier Ltd, 2015. Vol. 643, no. S1. PP. S67-S70.
72. **Jeelani P.G. et al.** Multifaceted Application of Silica Nanoparticles. A Review // *Silicon*. Springer, 2020. Vol. 12, no. 6. PP. 1337-1354.
73. **Rastogi A. et al.** Application of silicon nanoparticles in agriculture // *3 Biotech*. Springer Verlag, 2019. Vol. 9, no. 3.



КОМПОЗИТ-ЭКСПО

Пятнадцатая международная специализированная выставка

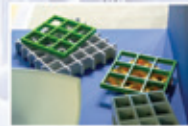
28 - 30 марта 2023

Москва, ЦВК «Экспоцентр»,
павильон 1

Основные разделы выставки:

- Сырье для производства композитных материалов, компоненты: смолы, добавки, термопластики, углеродное волокно и т.д.
- Наполнители и модификаторы
- Стеклопластик, углепластик, графитопластик, базальтопластик, базальтовые волокна, древесно-полимерный композит (ДПК), т.д.
- Полуфабрикаты (препреги)
- Промышленные (готовые) изделия из композитных материалов
- Технологии производства композитных материалов со специальными и заданными свойствами
- Оборудование и технологическая оснастка для производства композитных материалов
- Инструмент для обработки композитных материалов
- Измерительное и испытательное оборудование
- Сертификация, технический регламент
- Компьютерное моделирование
- Утилизация

Специальный раздел выставки:
КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ



Информационная поддержка:



Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»

115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507

Тел.: 8 495 988-1620 | E-mail: info@composite-expo.ru | Сайт: www.composite-expo.ru

YouTube youtube.com/user/compoexporusia

@compoexporus

@ocompo

Организатор:



ПОЛИУРЕТАНЭКС

Тринадцатая международная специализированная выставка

28 - 30 марта 2023

Москва, ЦВК «Экспоцентр»,
павильон 1

Основные разделы выставки:

- Сырье для производства полиуретанов (добавки, красители, катализаторы, наполнители, и т.д.)
- Оборудование и станки для производства и переработки полиуретанов (расходомерия, шестереночные, оседагональные (шнековые), шлеперные насосные установки, обрабатывающие станки, и т.д.)
- Конечная продукция (контактное уплотнение при литье, фильтры и т.д.)
- Услуги (лабораторные испытания, охрана здоровья и безопасность, переработка, защита окружающей среды, научные разработки)
- Техническое обслуживание оборудования
- Тестовое оборудование

Специальный раздел выставки:
КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ



Информационная поддержка:



Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»

115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507

Тел.: 8 495 988-1620 | E-mail: info@polyurethanex.ru | Сайт: www.polyurethanex.ru

YouTube youtube.com/user/polyexporu

@polyexporus

@ocompo

Организатор:

