



Возможности лазерных технологий для снижения биообрастания металлов в водной среде

И. А. Филатов, Е. А. Давыдова, Н. Н. Щедрина,
А. О. Пельтек, В. М. Прокопьев, Г. В. Одинцова
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В статье предложена технология лазерного структурирования поверхности металлов с целью защиты их поверхности от биообрастания. Данная технология предполагает обработку материала до помещения его в водную среду. В работе использовались сплавы нержавеющей стали и дюралюминия. Рассмотрено влияние лазерного структурирования на угол смачивания и взаимодействие лазерно-структурированных поверхностей металлов с микроорганизмами в воде. Выявлена положительная динамика в защите от колонизации микроорганизмов на поверхности металлов после лазерной обработки.

Ключевые слова: смачивание, лазер, микроструктурирование, гидрофобность, сталь, дюралюминий, биообрастание

Статья получена: 15.04.2022

Принята к публикации: 04.05.2022

ВВЕДЕНИЕ

Смачивание – это физическая взаимосвязь любой жидкости с твердым телом, проявляющаяся в способности уменьшать или увеличивать поверхностное натяжение этого твердого тела. Поверхностным натяжением называется явление, при котором твердое тело стремится уменьшить избыток своей поверхностной энергии

Laser Technologies Possibilities for Reducing Biofouling of Metals in the Aquatic Environment

I. A. Filatov, E. A. Davydova, N. N. Shchedrina,
A. O. Peltek, V. M. Prokopiev, G. V. Odintsova
ITMO University, St. Petersburg, Russia

The article presents the development of a laser structuring technology of the metals surface for protection against biofouling. This technology involves the processing of the material before placing it in the aquatic environment. Alloys of stainless steel and duralumin were used in the work. The effect of laser structuring on the contact angle and the interaction of laser-structured metal surfaces with microorganisms in water is considered. A positive trend in protection against colonization of microorganisms on the surface of metals after laser treatment was revealed.

Keywords: wetting, laser, microtexturing, metal surface, contact angle, biofouling

Received on: 15.04.2022

Accepted on: 04.05.2022

INTRODUCTION

Wetting is the physical relationship of any liquid with a solid body represented as the ability to reduce or increase the surface tension of this solid body. Surface tension is a phenomenon when a solid body tends to reduce its excess surface energy at the interface with the liquid. An increase in the surface tension degree of a solid body causes the liquid to spread, indicating the hydrophilic properties. Reduction in the tension degree, on the contrary, lowers the surface energy and the liquid does not wet the hydrophobic surface.

на границе раздела с жидкостью. Увеличение степени натяжения поверхности твердого тела приводит к тому, что жидкость растекается, что указывает на гидрофильные свойства. Уменьшение степени натяжения, наоборот, понижает поверхностную энергию, и жидкость не смачивает гидрофобную поверхность.

Смачивание поверхности металлов играет важную роль в протекании технологических процессов [1]. Проблема формирования гидрофобных или гидрофильных покрытий актуальна во многих отраслях производства и медицины. Например, гидрофильные поверхности необходимы для повышения адгезии покрытий [2], снижения трения [3] и для улучшения адгезии биологических объектов [4–6]. Гидрофобные поверхности важны для создания антибактериальных покрытий [7], для уменьшения обледенения поверхностей [8], для предотвращения биообрастания судов [9], а также коррозии металлов [10].

Все погружаемые в морскую воду и не обработанные защитным слоем объекты в скором времени будут заселены различными микроорганизмами (водоросли, бактерии, планктон, ракообразные, моллюски). В природе это называется биообрастанием, и оно несет серьезные последствия для всех кораблей военно-морской промышленности. Микроорганизмы оседают на поверхность корабля и создают повышенную шероховатость, что ведет к увеличенному расходу топлива корабля, повышенной нагрузке на движущие узлы и уменьшению маневренности [9, 11]. Сопrotивление трения на некоторых типах корпусов кораблей может составлять до 90% от общего значения [12]. Чем больше сопротивление корабля, тем больше затраты на судовые операции, такие как увеличение запаса топлива, очистка корпуса от микроорганизмов и другие. Согласно анализу биообрастания увеличивает расход топлива на 10% по сравнению с гидравлически гладким состоянием корпуса корабля [12].

Традиционно биообрастание сооружений в море делят на несколько основных фаз: первичное пленкообразование слизистого слоя микроорганизмов (заселение бактерий, диатомовых водорослей, синезеленых водорослей, грибов); вторичный этап (заселение макроводорослей, ракушек) и третичный (заселение мидий, губок, рачков). Это произвольные последовательности, которые могут сильно различаться в зависимости от сезона и географического положения [13].

The metal surface wetting plays an important role in the technological processes [1]. The issue of hydrophobic or hydrophilic coating formation is relevant in many industries and medicine. For example, the hydrophilic surfaces are required to increase the coating adhesion [2], reduce friction [3], and improve the adhesion of biological objects [4–6]. The hydrophobic surfaces are important for development of antibacterial coatings [7], for reducing the surface icing [8], for preventing vessel biofouling [9], as well as metal corrosion [10].

All objects immersed in the sea water and not covered with a protective layer will soon be populated by various microorganisms (algae, bacteria, plankton, crustaceans, mollusks). In nature, this phenomenon is called biofouling, and it has serious consequences for all navy vessels. The microorganisms are settled on the vessel surface and create the raised roughness that leads to the increased fuel consumption of the ship, increased load on the driving units and lowered maneuverability [9, 11]. The friction resistance on some types of marine hulls can be up to 90% of the total value [12]. The greater the vessel resistance, the greater the cost of ship operations, such as increasing the fuel supply, the hull cleaning against microorganisms, etc. According to the analysis, biofouling leads to the increased fuel consumption by 10% compared to the hydraulically smooth condition of the vessel hull [12].

Typically, biofouling of the marine structures is divided into several main stages: primary film formation of the mucous layer of microorganisms (settlement of bacteria, diatoms, blue-green algae, fungi); secondary stage (settlement of macroalgae, shells) and tertiary stage (settlement of mussels, sponges, crustaceans). These are arbitrary sequences that can vary greatly depending on the season and geographic location [13].

The hydrophobic surface development makes it possible to reduce friction resistance and control the biological fouling process [9]. The coatings made of toxic paints, including the resins, heavy metals (lead), arsenic, have an adverse effect on the marine life [11]. Therefore, there is a need to think out new ways for metal processing without any environmental damage.

There are various methods of metal surface treatment to impart hydrophobic or hydrophilic properties due to the amended contact angle. The contact angle can be changed by controlling the chemical composition and surface morphology by the mechanical [14], chemical [14], and thermal [15] methods. Of particular interest is laser processing, due to which it is possible



Создание гидрофобной поверхности позволяет уменьшить сопротивление трения и контролировать процесс биологического обрастания [9]. Покрытия из токсичных красок, в состав которых входят смолы, тяжелые металлы (свинец), мышьяк, оказывают неблагоприятное воздействие на морских обитателей [11]. Поэтому существует необходимость придумывать новые способы обработки металла без вреда окружающей среде.

Существуют разные методы обработки поверхности металла для придания гидрофобных или гидрофильных свойств путем изменения угла смачивания. Угол смачивания возможно менять путем контроля химического состава и морфологии поверхности механическими [14], химическими [14] и тепловыми [15] методами. Особый интерес представляет лазерная обработка, благодаря которой возможно локально управлять углом смачивания без использования расходных материалов. Поэтому было принято решение исследовать возможности лазерных технологий для снижения биообрастания металлов в водной среде за счет использования коммерчески доступных лазерных комплексов.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Структурирование образцов проводилось при нормальных условиях в воздушной атмосфере с использованием технологической установки на базе импульсного иттербиевого волоконного лазера мощностью 50 Вт с длиной волны $\lambda=1,064$ мкм, генерирующего импульсы с частотой 50–100 кГц и длительностью 100 нс. В качестве экспериментальных образцов были взяты пластины нержавеющей стали AISI 430 (St) и дюралюминия АМцМ (Al). Данные сплавы были выбраны потому, что они являются наиболее распространенными сплавами, используемыми при изготовлении корпусов и других конструкторских деталей кораблей. При выборе лазерного источника важным фактором было то, что выбранные нами сплавы имеют пик поглощения на длине волны лазерного источника, что делает процесс обработки данных образцов эффективным. Морфология поверхностей изучалась на оптическом микроскопе Zeiss Axio Imager A1M. С помощью контактного профилометра Hommel Werke T8000 также изучалась морфология и топология поверхности.

Для измерения угла смачивания применялся метод лежащей капли. Была использована цифровая камера TouPCam, программное обеспечение

to locally control the contact angle without any consumables. Therefore, it has been decided to explore the capabilities of laser technologies to reduce the metal biofouling in the aquatic environment due to the use of commercially available laser stations.

METHODS AND MATERIALS

The sample structuring was performed under normal conditions in an air atmosphere using a processing unit based on a pulsed ytterbium fiber-optics laser with a power of 50 W and a wavelength of $\lambda=1.064$ μm , generating pulses with a frequency of 50–100 kHz and a duration of 100 ns. AISI 430 (St) stainless steel and AMtsM (Al) duralumin plates were used as the development prototypes. These alloys were selected since they were the most common alloys used for the production of marine hulls and other structural vessel parts. When selecting a laser source, an important factor was that the alloys selected had an absorption peak at the laser source wavelength that makes the sample processing efficient. The surface morphology was studied using a Zeiss Axio Imager A1M optical microscope. The surface morphology and topology were also studied using a Hommel Werke T8000 contact profilometer.

The contact angle was measured using the sessile drop method. The TouPCam digital camera and TouView software were used for the result processing. Distilled water was used as the test liquid. The drop volume for measurement in the biofouling test was 3 μl . The drop dosing and placement were performed using a Satorius mechanical dispenser with a volume of 0.1–10 μl . After surface placement of the drop, AutoCad software was used to measure the contact angle.

A water specimen was taken from the coastal zone of the Gulf of Finland in Saint-Petersburg as a medium for the samples. This specimen included such microorganisms as cladophora (in Latin: *Cladophora*), enteromorpha (in Latin: *Ulva intestinalis*), diatoms (in Latin: *Diatomeae*), barnacles larvae (in Latin: *Cirripedia*) [16], *Pseudomonas* spp., *Stenotrophomonas* spp, and *Rahnella* strains [17].

To carry out the experiments to study the contact angle dependence of substrates made of alloys subjected to various laser processing on the time of sample retention in water, we placed the samples in an aquarium with water from the Gulf of Finland. The study kit consisted of unstructured samples and samples obtained immediately after the laser structuring. The experiment concept implied that the surface acquired hydrophobic properties due to the organic compound adsorption from the environment to the

TopView для обработки результатов. В качестве тестовой жидкости использовалась дистиллированная вода. Объем капли для измерения в эксперименте биообрастания составлял 3 мкл. Дозирование и размещение капли осуществлялось с помощью механического диспансера Satorius объемом 0,1–10 мкл. После размещения капель на поверхность использовалось программное обеспечение AutoCad для измерения контактного угла.

В качестве среды нахождения образцов была взята проба воды из прибрежной зоны Финского залива г. Санкт-Петербурга, в которой находятся такие микроорганизмы как кладофора (лат. *Cladophora*), энтероморфа (лат. *Ulva intestinalis*), диатомовые водоросли (лат. *Diatomeae*), усоногие личинки (лат. *Cirripedia*) [16], штаммы *Pseudomonas spp.*, *Stenotrophomonas spp* и *Rahnella* [17].

Для проведения экспериментов по исследованию зависимости угла смачивания подложек из сплавов, подвергнутых различной лазерной обработке, от времени нахождения образцов в воде мы помещали образцы в аквариум с водой из Финского залива. Исследовательский набор состоял из неструктурированных образцов и образцов, полученных сразу после лазерного структурирования. Идея эксперимента заключалась в том, что поверхность приобретает гидрофобные свойства за счет адсорбции органических соединений из окружающей среды на поверхность оксида, образованного под воздействием лазерного излучения. При этом за счет образования новых функциональных групп состояние смачивания меняется [18]. Поэтому мы решили после лазерного структурирования выдерживать образцы на воздухе в течение 3-х недель для осаждения на их поверхности органических соединений. Для ускорения процесса перехода в гидрофобное состояние был также использован низкотемпературный отжиг в муфельной печи ПМ-10 в течение 3 часов при температуре 100 °С. Все образцы помещались в аквариум с водой из Финского залива, замеры углов смачивания производились каждую неделю в течение месяца.

Для оценки степени биообрастания биопленка, образующаяся на поверхности образцов, измерялась на конфокальном микроскопе Leica TCS SP8. Перед этим образцы фиксировались формалином, а затем использовался пропидий йодид, который окрашивает ядра организмов, находящихся в воде.

oxide surface formed under the laser radiation. In this case, the wetting state changed due to the formation of new functional groups [18]. Therefore, after laser structuring, we decided to hold the samples in air for 3 weeks to deposit organic compounds on their surface. To accelerate the process of transition to the hydrophobic state, the low-temperature annealing in a PM-10 muffle furnace for 3 hours at a temperature of 100 °C was also used. All samples were placed in an aquarium with water from the Gulf of Finland, the contact angles were measured every week within one month.

To assess the biofouling degree, the biofilm formed on the sample surface was measured using a Leica TCS SP8 confocal microscope. Before this, the samples were formalin-fixed, with the following usage of propidium iodide to stain the nuclei of organisms in water.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Laser Formation of Microstructures on the Metal Surfaces with Various Contact Angles

In our study, we focused on the primary and secondary biofouling stages. Therefore, we studied the behavior of such microorganisms, the size of which varied in the range from 50 microns to 1000 microns, such as cladophora (in Latin: *Cladophora*), barnacles (in Latin: *Balanus*), diatoms (in Latin: *Diatomeae*), barnacle larvae (in Latin *Cirripedia*) and other organisms of similar size. We believe that to ensure the least adhesion of these organisms to the surface, the obtained microrelief period should be no more than 100 microns. It is also known that the hydrophobic properties can protect surfaces against biofouling due to the low surface energy at the interface between the solid body and air. It prevents the sticky adhesive of microorganisms from interacting with the material [9]. Fig. 1 shows a schematic representation of metal laser structuring to develop the hydrophobic properties and behavior of a given laser-induced surface in an aqueous environment compared to an untreated one.

When selecting the structuring modes, we took the hydrophobic reliefs of a lotus and a rose as the basis for the resulting geometric structure. They had the so-called columns with dimensions of 50 μm and 16 μm , respectively, and a height of 10 μm .

The structures with the dimensions of 7×7 mm were developed in each sample. The laser beam recording was performed in planes so that the resulting grooves were perpendicular to each other and formed a lattice (Fig. 2). The resulting grooves had a width of 34

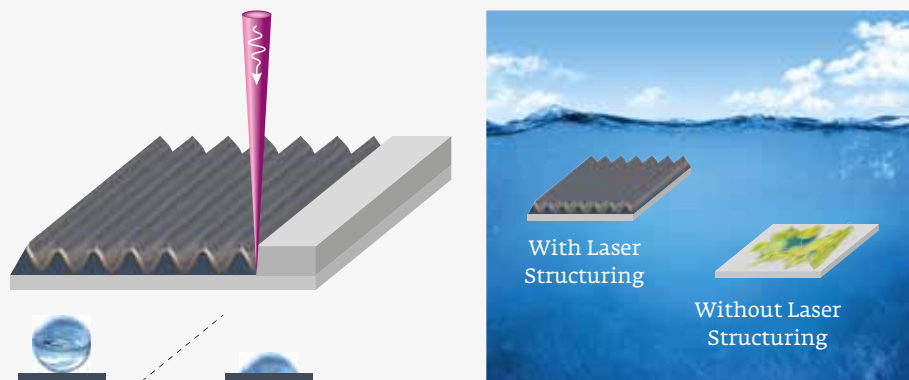


Рис. 1. Схематическое представление лазерного структурирования металлов для формирования гидрофобных свойств и поведения данной лазерно-индуцированной поверхности в водной среде по сравнению с необработанной

Fig. 1. Schematic image of metals laser structuring for the hydrophobic properties formation and the behavior of the laser-structured surface in an aqueous environment compared to the unstructured one

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Лазерное формирование микроструктур на поверхности металлов с различным углом смачивания

В нашем исследовании мы ориентировались на первичный и вторичный этап биообрастания. Поэтому нами было исследовано поведение таких микроорганизмов, размеры которых варьировались в диапазоне от 50 мкм до 1000 мкм, как кладофора (лат. Cladophora), баянусы (лат. Balanus), диатомовые водоросли (лат. Diatomeae), усоногие личинки (лат. Cirripedia) и иные организмы подобных размеров. Мы считаем, что для обеспечения наименьшего сцепления данных организмов с поверхностью период создаваемого микро рельефа должен составлять не более 100 мкм. Также известно, что гидрофобные свойства могут защищать поверхности от процесса биообрастания благодаря низкой поверхностной энергии на границе раздела твердого тела и воздуха, что не дает клейкому адгезиву микроорганизмов взаимодействовать с материалом [9]. На рис. 1 показано схематическое представление лазерного структурирования металлов для формирования гидрофобных свойств и поведения данной лазерно-индуцированной поверхности в водной среде по сравнению с необработанной.

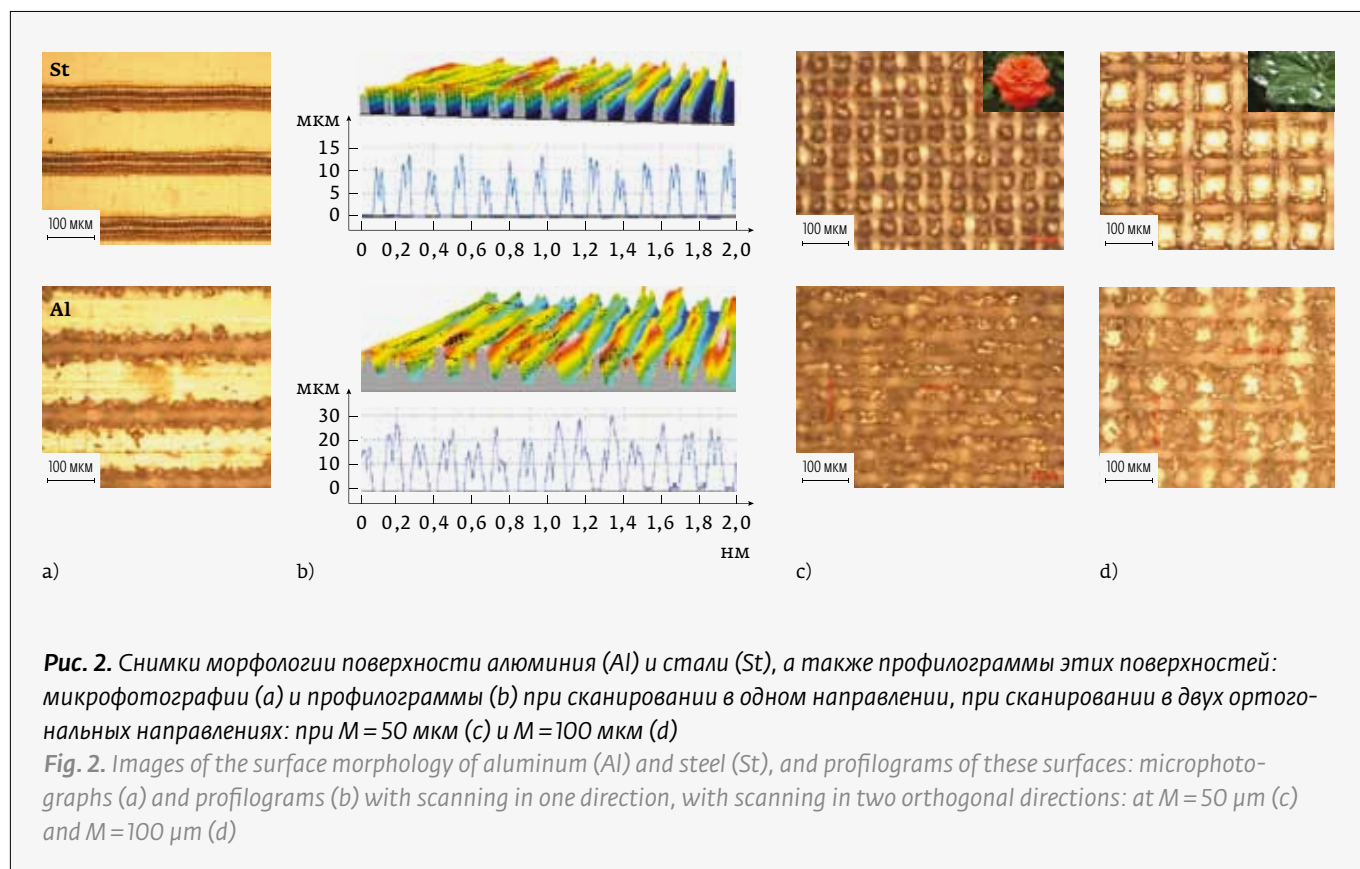
При подборе режимов структурирования мы взяли за основу получаемой геометрической структуры гидрофобные рельефы лотоса и розы, имеющие так называемые столбики размерами

μm and a depth of 10–12 μm. Based on the laser beam scanning pitch (M) of 50 μm and 100 μm, the dimensions of the protrusions (columns) were 16 μm and 66 μm, respectively. For each week of contact angle measurements, 5 samples were prepared for one type of treatment and one scanning pitch for individual modes of both metals. Fig. 2 provides photographs of the surface morphology of aluminum and steel obtained using an optical microscope, as well as the profile records of these surfaces.

The contact angles were used to obtain the dependency diagrams of these angles on the sample retention time in water (Fig. 3). On these diagrams, the value given for the first day was the sample contact angle prior to its placement in the aquarium. In some cases, the contact angle was 180 degrees due to the inability to measure the angle, since the drop was not placed on the surface, but remained on the Satorius mechanical dispenser.

During the study of the results obtained for unstructured samples, no explicit dependence is observed. For the specimens which study has begun immediately after the laser structuring process, a slight increase in the angle is observed for all modes after a month in the aquarium.

To obtain the hydrophobic and superhydrophobic structures, we retained our samples after laser structuring in air for 3 weeks to precipitate organics. To speed up this process, other samples after laser structuring were subjected to the low-temperature annealing in a muffle furnace. As a result, we obtained the hydrophobic angles for distilled water prior to



порядка 50 мкм и 16 мкм соответственно и обладающие высотой порядка 10 мкм.

На каждом образце были созданы структуры размером $7 \times 7\ \text{мм}$, лазерная запись производилась в плоскостях таким образом, чтобы получаемые канавки были перпендикулярны друг другу, образуя решетку (рис. 2). Полученные канавки имели ширину 34 мкм, а глубину – 10–12 мкм. Исходя из параметра шага сканирования лазерным пучком (M) в 50 мкм и 100 мкм, размеры выступов (столбиков) были 16 мкм и 66 мкм соответственно. На каждую неделю замеров углов смачивания было подготовлено по 5 образцов для одного вида обработки и одного значения шага сканирования для индивидуальных режимов обоих металлов. На рис. 2 предоставлены снимки морфологии поверхности алюминия и стали с оптического микроскопа, а также профилограммы этих поверхностей.

По замерам углов смачивания были получены графики зависимости этих углов от времени пребывания образцов в воде (рис. 3). На графиках значение, указанное для первого дня, – это угол смачивания образца до момента помещения его в аквариум. В некоторых случаях угол смачивания равен 180 градусов, что связано с невозмож-

но размещения образца в аквариуме. Образцы, подверженные воздействию воздуха в течение 3 недель после лазерной структуризации, продемонстрировали более высокие гидрофобные значения для большинства режимов. Однако, эти образцы потеряли свою гидрофобность после воздействия воды. Мы считаем, что энергия связи органических соединений с оксидами на металлической поверхности не была достаточно высокой, и органические соединения были смыты водой.

Таким образом, до размещения образца в водной среде для обоих металлов с шагом сканирования 50 мкм (в течение обработки для гидрофобизации поверхности), было возможно получить гидрофобные углы, превышающие значения, полученные при обработке с шагом сканирования 100 мкм. Это было связано с тем, что при увеличении шероховатости гидрофобной поверхности в рамках одного материала, гидрофобные свойства также увеличивались, то есть, контактный угол увеличивался.

2. Assessment of the Metal Surface Biofouling Degree Before and After Laser Treatment

Fig. 4 shows the results of the biofouling degree for the samples with different treatments. The X-axis indicates the time spent by the samples in water taken from the coastal zone of the Gulf of Finland, and the

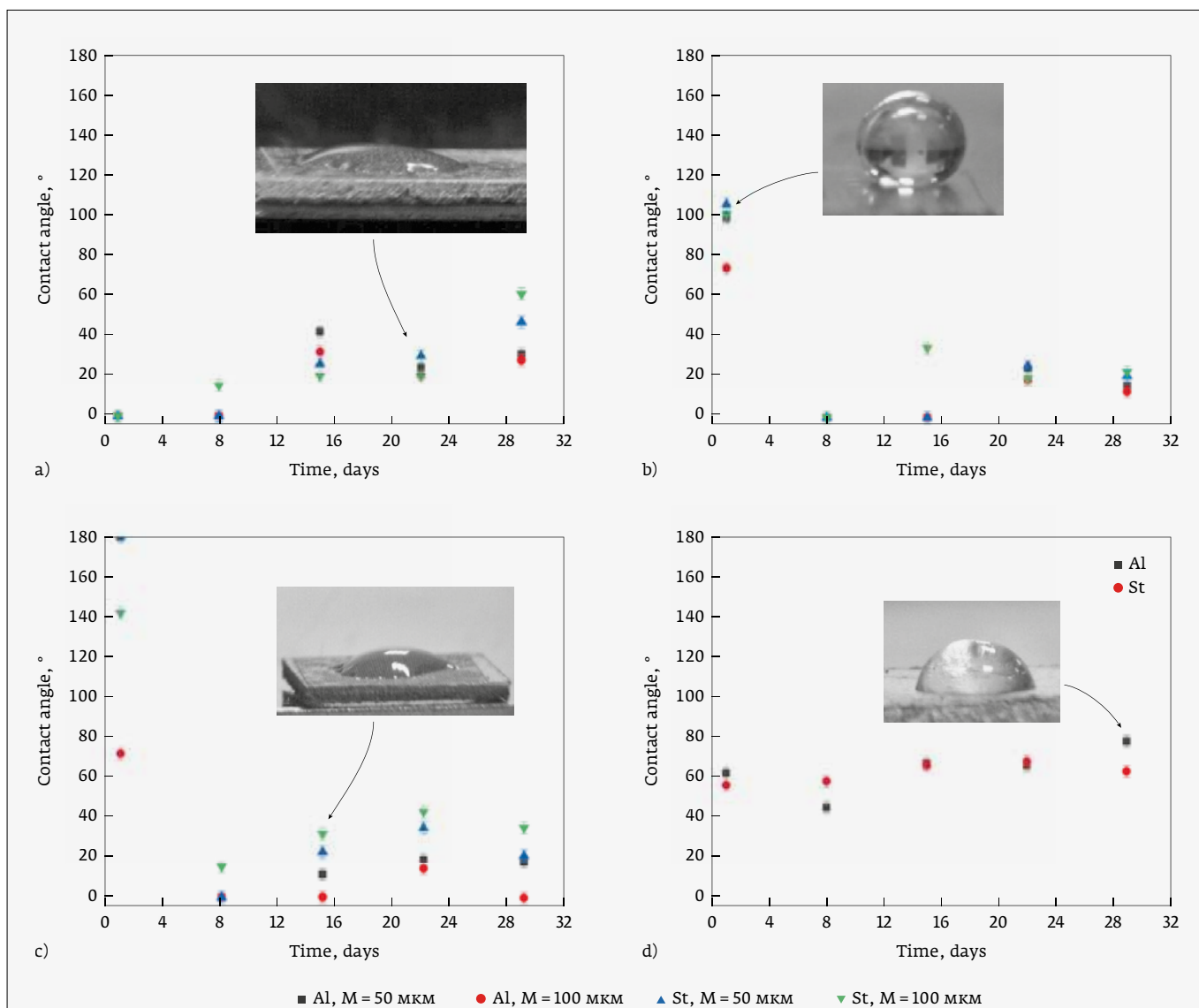


Рис. 3. Зависимость контактного угла дистиллированной воды на поверхности алюминия (Al) и стали (St) от времени пребывания в воде: после лазерного структурирования (a); после лазерного структурирования и низкотемпературного отжига (b); после лазерного структурирования и выдержке на воздухе (c); неструктурированный образец (d)

Fig. 3. Dependence of the contact angle of distilled water on the surface of aluminum (Al) and steel (St) on the residence time in water: after laser structuring (a); after laser structuring and low-temperature annealing (b); after laser structuring and exposure to air (c); unstructured sample (d)

стью измерить угол, так как капля не помещалась на поверхность, а оставалась на механическом диспансере Satorius.

В ходе исследования полученных результатов для неструктурированных образцов явной зависимости не наблюдается. Для образцов, чье исследование начиналось сразу после лазерного структурирования, через месячный период нахождения в аквариуме наблюдается небольшой прирост угла для всех режимов.

Y-axis indicates the fluorescent intensity produced by the nuclei of microorganisms. Thus, a qualitative assessment of the fouling degree was based on the fluorescence of the nuclei. The results demonstrated the least biofouling in the case of laser structuring and subsequent long-term exposure to air. An analysis of the graphical dependencies led to the conclusion that it was during this treatment (laser structuring and prolonged exposure to air) that the microorganisms did not find these structures convenient for

Для получения гидрофобных и супергидрофобных структур мы оставляли наши образцы после лазерного структурирования на воздухе на 3 недели для осаждения органики, а для ускорения данного процесса другие образцы после лазерного структурирования подвергали низкотемпературному отжигу в муфельной печи. В результате мы смогли получить гидрофобные углы для дистиллированной воды до помещения образцов в аквариум. На образцах, которые находились 3 недели на воздухе после лазерного структурирования, были получены большие гидрофобные значения для большинства режимов. Однако

colonization that was related to the superhydrophobic angles.

We link the decrease in the biofouling degree over time during the treatments with the hypothesis that the microorganisms fail to colonize on the surface, since our structures are unfavorable for them both in size and in surface properties preventing their adhesive substance to bind.

CONCLUSION

Based on the biofouling degree assessment results, it has been concluded that the sample long-term exposure to air after laser structuring is a favorable

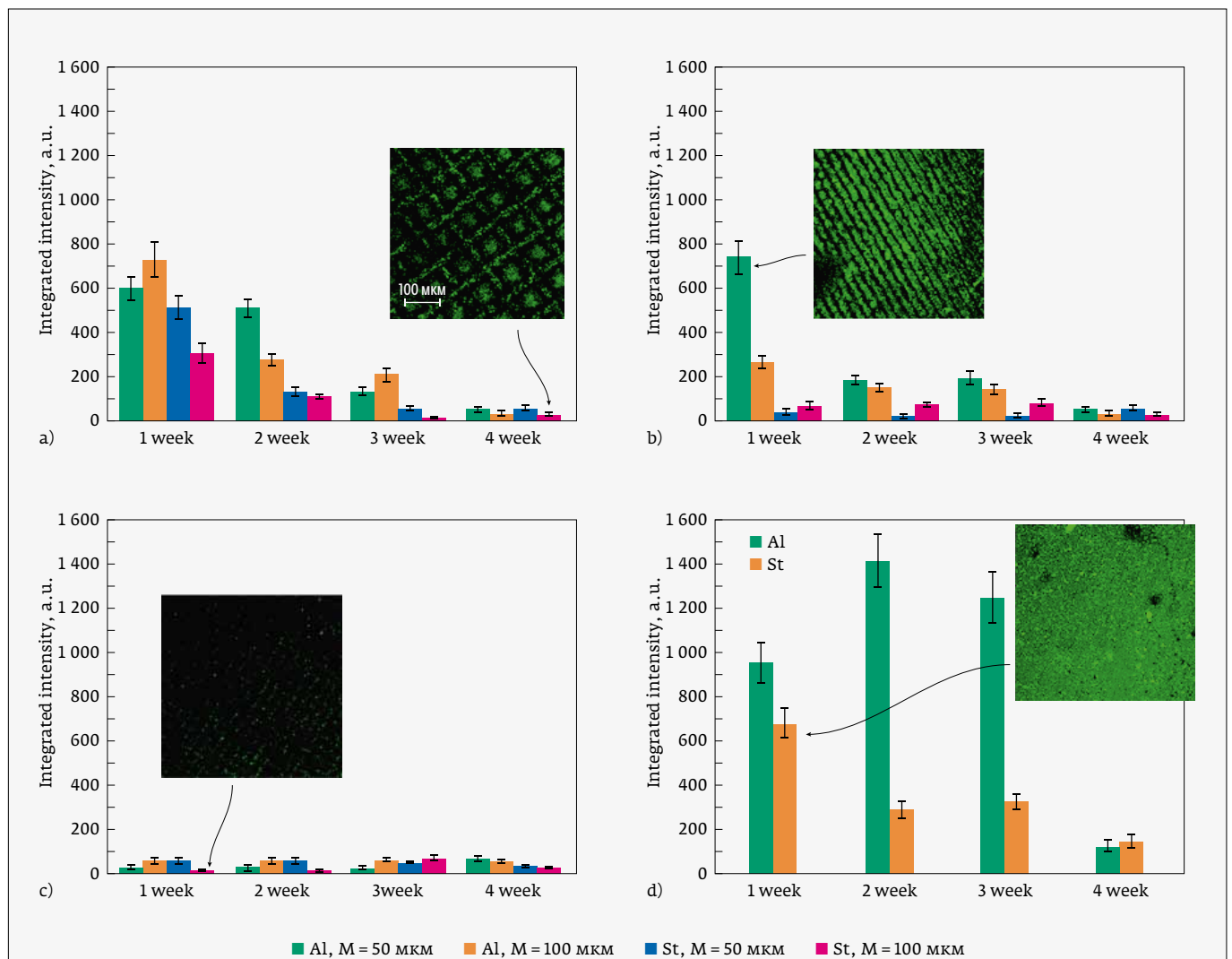


Рис. 4. Результаты степени биообрастания на образцах с различной обработкой: после лазерного структурирования (a); после лазерного структурирования и низкотемпературного отжига (b); после лазерного структурирования и выдержке на воздухе (c); неструктурированный образец (d)

Fig. 4. The results of the degree of biofouling on samples with different processing: after laser structuring (a); after laser structuring and low-temperature annealing (b); after laser structuring and exposure to air (c); unstructured sample (d)



данные образцы утрачивали свою гидрофобность после нахождения в воде. Мы считаем, что энергия связи органических соединений с оксидами на поверхности металлов была недостаточно высока, и органические соединения смывались водой.

Таким образом, перед помещением образцов в водную среду для обоих металлов при шаге сканирования 50 мкм (при обработке для гидрофобизации поверхности) удалось получить гидрофобные углы больше, чем для обработки с шагом сканирования 100 мкм. Это вызвано тем, что при увеличении шероховатости гидрофобной поверхности в рамках одного материала увеличиваются и гидрофобные свойства, то есть растет контактный угол смачивания.

2. Оценка степени биообрастания поверхности металлов до и после лазерной обработки

На рис. 4 показаны результаты степени биообрастания на образцах с различной обработкой. По оси абсцисс указано время нахождения образцов в воде, взятой из прибрежной зоны Финского залива, а по оси ординат указана интенсивность флуоресцентного свечения, которое дают ядра микроорганизмов. Таким образом качественная оценка степени обрастания проводилась по флуоресцентному свечению ядер. Результаты показали наименьшее биообрастание при лазерном структурировании и последующей продолжительной выдержке на воздухе. Анализ графических зависимостей позволил сделать вывод, что именно при данной обработке (лазерное структурирование и продолжительная выдержка на воздухе) микроорганизмы не находили данные структуры удобными для колонизации, что связано с супергидрофобными значениями углов.

Уменьшение степени биообрастания с течением времени при обработках мы связываем с гипотезой о том, что микроорганизмам не удается колонизироваться на поверхности, так как наши структуры неблагоприятны для них как по размерам, так и по свойствам поверхности, чтобы сцепиться с ней своим адгезивным клейким веществом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам оценки степени биообрастания сделан вывод о том, что выдержка образцов после лазерного структурирования на воздухе продолжительное время оказывается благоприятным режимом для защиты от металлических подло-

mode for the metal substrate protection against biofouling, since the biofouling indices have the lowest values. We associate it with the fact that the superhydrophobic angles are obtained for most modes during the laser structuring and air treatment. Thus, in the case of such treatment of both steel and aluminum, imitation of the structure of a lotus and a rose is a possible solution to the problem of protection against biofouling. When comparing the graphical results, we can conclude that a scanning pitch of 50 μm for steel and a scanning pitch of 100 μm for aluminum are optimal for laser structuring and subsequent low-temperature annealing. This conclusion is made based on a comparison of the biofouling degree of unstructured samples and samples obtained immediately after the laser structuring with the samples obtained after laser structuring and low-temperature annealing.

For further study of the results obtained, it is planned to put the system under study in motion during the further experiments so that the samples are not in a stagnant water, as well as to measure the biofouling level by a parametric method, while varying the number of organisms of certain species planted in water.

ABOUT AUTHORS

Filatov Ilya Andreevich, PhD student, Faculty of Nanoelectronics, ITMO University, St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0002-4555-8206

Davydova Evgenia Alexandrovna, student, Faculty of Nanoelectronics, ITMO University, St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0001-9009-6154

Shchedrina Nadezhda Nikolaevna, student, Faculty of Nanoelectronics, ITMO University, St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0002-1517-1043

Oleksii O. Peltek, PhD student, Faculty of Physics, ITMO University, St. Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0002-1485-7000

Prokopiev Vladislav Mikhailovich, student, Faculty of Nanoelectronics, ITMO University, St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0002-3943-2885

Odintsova Galina Viktorovna, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, International Scientific Laboratory for Laser Micro- and Nanotechnologies, ITMO University, Department of Nanoelectronics, St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0001-9581-4290

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Filatov I. A. – work planning, organization of the experiment, analysis of the results and preparation of their graphical interpretation; Davydova E. A. – conducting the experiment; Shchedrina N. N. – processing of the results and their interpretation; Peltek A. O. – investigation of the degree of biofouling; Prokopiev V. M. – laser structuring of samples Odintsova G. V. – the concept and design of the work, text editing.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interest and they supplemented the manuscript in part of their work.

РОССИЙСКАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ НЕДЕЛЯ

24–27.10.2022

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



www.technoforum-expo.ru



www.rusweld-expo.ru



www.expo.ronktd.ru



www.reklama-expo.ru



жек от биообрастания, так как показатели биообрастания имеют наименьшие значения. Мы связываем это с тем, что для большинства режимов при лазерном структурировании и обработке на воздухе были получены супергидрофобные углы. Таким образом, и для стали, и для алюминия при данной обработке имитация структуры лотоса и розы является возможным решением проблемы защиты от биообрастания. При сравнении графических результатов можно сделать вывод о том, что шаг сканирования 50 мкм для стали и шаг сканирования 100 мкм для алюминия являются оптимальными при обработке лазерным структурированием и последующим низкотемпературным отжигом. Данный вывод сделан, исходя из сравнения степени биообрастания неструктурированных образцов и образцов, полученных сразу после лазерного структурирования, с образцами, полученными после лазерного структурирования и низкотемпературного отжига.

Для дальнейшего исследования полученных результатов планируется в дальнейших экспериментах привести исследуемую систему в динамику, чтобы образцы не находились в стоячей воде, а также измерить уровень биообрастания параметрическим методом, варьируя количество высаживаемых в воду организмов определенных видов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Summ B., Goryunov Yu.** Fiziko-khimicheskie osnovy smachivaniya I rastekaniya. – M.: Khimiya. 1976. 232 p. (In Russ.).
2. **Li J., Zhou Y., Fan F., Du F., Yu H.** Controlling surface wettability and adhesive properties by laser marking approach. *Optics and Laser Technology*. 2019; 115: 160–165. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.02.023.
3. **Liu K., Jiang L.** Metallic surfaces with special wettability. *Nanoscale*. 2011; 3(3): 825–838. DOI: 10.1039/CONR00642D.
4. **V. P. Veiko, Yu. Yu. Karlagina, V. V. Romanov, R. M. Yatsuk, E. E. Egorova, E. A. Zernitskaya, A. I. Yaremenko, G. N. Chernenko, S. G. Gorny, G. V. Odintsova.** Laser Technology for Structuring the Surface of Dental Titanium Implants, Part 1. *Photonics Russian*. 2020; 14(5):462–472. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.5.462.472.
5. **V. P. Veiko, Yu. Yu. Karlagina, V. V. Romanov, R. M. Yatsuk, E. E. Egorova, E. A. Zernitskaya, A. I. Yaremenko, G. N. Chernenko, S. G. Gorny, G. V. Odintsova.** Laser Technology for Structuring the Surface of Dental Titanium Implants, Part 2. *Photonics Russian*. 2020; 14(6):510–519. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.6.510.519.
6. **Wyman P.** Hydrophilic coatings for biomedical applications in and ex vivo. *Coatings for Biomedical Applications*. Elsevier. 2012; 3–42. DOI: 10.1533/9780857093677.1.3.
7. **Kylián O., Kratochvíl J., Petr M., Kuzminova A., Slavínská D., Biederman H., Beranová J.** Ag/C:F Antibacterial and hydrophobic nanocomposite coatings. *Functional Materials Letters*. 2017; 10(3): 1750029 (4 pages). DOI: 10.1142/S1793604717500291.
8. **Avrămescu R. E., Ghica M. V., Dinu-Pîrvu C., Prisada R., Popa L.** Superhydrophobic Natural and Artificial Surfaces – A Structural Approach. *Materials (Basel)*. MDPI AG. 2018; 11(5): 866. DOI: 10.3390/ma11050866.
9. **Ferrari M., Benedetti A., Santini E., Ravera F., Liggieri L., Guzman E., Cirisano F.** Biofouling control by superhydrophobic surfaces in shallow euphotic seawater. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2015; 480:369–375. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2014.11.009.
10. **Ran M., Zheng W., Wang H.** Fabrication of superhydrophobic surfaces for corrosion protection: a review. *Materials Science and Technology*. 2019; 35(3):313–326. DOI: 10.1080/02670836.2018.1560985.
11. **Lejars M., Margailan A., Bressy C.** Fouling Release Coatings: A Nontoxic Alternative to Biocidal Antifouling Coatings. *Chemical reviews*. 2012; 112(8):4347–4390. DOI: 10.1021/cr200350v.
12. **Schultz M. P., Bendick J. A., Holm E. R., Hertel W. M.** Economic impact of biofouling on a naval surface ship. *Biofouling*. 2011; 27(1):87–98. DOI: 10.1080/08927014.2010.542809.
13. **Jones, G.** The battle against marine biofouling: a historical review. *Advances in Marine Antifouling Coatings and Technologies*, 2009, 19–45. DOI:10.1533/9781845696313.1.19.
14. **Forooshani H. M., Aliofkhaezrai M., Rouhaghdam A. S.** Superhydrophobic aluminum surfaces by mechanical/chemical combined method and its corrosion behavior. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2017; 72:220–235. DOI: 10.1016/j.jtice.2017.01.014.
15. **Rukosuyev M. V., Lee J., Cho S. J., Lim G., Jun M. B.** One-step fabrication of superhydrophobic hierarchical structures by femtosecond laser ablation. *Applied Surface Science*. 2014; 313:411–417. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.05.224.
16. **Polyak Y. M., Gubelit Y. I., Shigaeva T. D., Bakina L. G., Kudryavtseva V. A., Dembska G., Pazikowska-Sapota G.** Monitoring of the Gulf of Finland, Baltic sea: antropogenic pressure on biogeochemical, processes in the coastal zone. *Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling*. 2018; 29(2):99–117. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-2-99-117.
17. **Izmalkova T. Y., Gafarov A. B., Sazonova O. I., Sokolov S. L., Kosheleva I. A., Boronin A. M.** Raznoobrazie mikroorganizmov-neftedestruktorov Finskogo zaliva Baltijskogo morya v zimnij i letnij periody. *Mikrobiologiya*. 2018; 87(2):204–214. DOI: 10.7868/S0026365618020106.
18. **Shchedrina N., Karlagina Y., Itina T. E., Ramos A., Correa D., Tokmacheva-Kolobova A., Manokhin S., Lutoshina D., Yatsuk R., Krylach I., Odintsova G.** Wetting angle stability of steel surface structures after laser treatment. *Optical and Quantum Electronics*. 2020; 52(3):1–12. DOI: 10.1007/s11082-020-02280.

АВТОРЫ

Филатов Илья Андреевич, аспирант, факультет наноэлектроники, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0002-4555-8206

Давыдова Евгения Александровна, студент, факультет наноэлектроники, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0001-9009-6154

Щедрина Надежда Николаевна, студент, факультет наноэлектроники, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0002-1517-1043

Пельтек Алексей О., аспирант, физический факультет, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0002-1485-7000

Прокопьев Владислав Михайлович, студент, факультет наноэлектроники, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0002-3943-2885

Одинцова Галина Викторовна, к. т. н., старший научный сотрудник, Международная научная лаборатория лазерных микро- и нанотехнологий, Университет ИТМО, факультет наноэлектроники, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0001-9581-4290

ВКЛАД АВТОРОВ

Филатов И. А. – планирование работ, организация эксперимента, анализ результатов и подготовка их графической интерпретации; Давыдова Е. А. – проведение эксперимента; Щедрина Н. Н. – обработка результатов и их интерпретация; Пельтек А. О. – исследование степени биообрастания; Прокопьев В. М. – лазерное структурирование образцов; Одинцова Г. В. – концепция и дизайн работы, редактирование текста.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают отсутствие реального или потенциального конфликта интересов. Все авторы ознакомлены и согласны с рукописью.

XXVI МЕЖДУНАРОДНАЯ
ВЫСТАВКА СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА

ufi
Approved
Event



INTERPOLITEX '22



18—20 ОКТЯБРЯ 2022
МОСКВА, МВЦ «КРОКУС ЭКСПО»

ВТОРОЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
«ИНТЕРПОЛИТЕХ: ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА»



При поддержке



Соорганизатор

СВЯЗИСТ

Проект ОВК «БИЗОН»



INTERPOLITEX.RU



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosphere.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1800 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru