

Ксения Артуровна БАТИЩЕВА¹
Юлия Николаевна ВЫМПИНА²
Евгения Георгиевна ОРЛОВА³

УДК 532.64

**ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ
АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВА
НА «САМОСБОРКУ» НАНОЧАСТИЦ
ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЕЛЬ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ***

¹ аспирант, инженер научно-образовательного центра И. Н. Бутакова
Инженерной школы энергетика,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
bka1801@mail.ru; ORCID: 0000-0002-2810-6769

² аспирант, инженер отделения электроэнергетики и электротехники
Инженерной школы энергетика,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
упр2@tpu.ru

³ кандидат физико-математических наук,
старший преподаватель научно-образовательного центра И. Н. Бутакова
Инженерной школы энергетика,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
lafleur@tpu.ru

Аннотация

Установление характеристиками процесса «самосборки» микронных и субмикронных частиц при испарении капель коллоидных растворов с поверхностей твердых тел

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-38-90027).

Цитирование: Батищева К. А. Влияние лазерной обработки поверхности алюминий-во-магниевый сплав на «самосборку» наночастиц при испарении капель коллоидных растворов / К. А. Батищева, Ю. Н. Вымпина, Е. Г. Орлова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Том 7. № 1 (25). С. 26-43.
DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-26-43

является актуальной задачей из-за возможности применения получаемых с помощью капельных технологий структур для создания и оптимизации производства устройств прямого и непрямого жидкостного охлаждения, рабочих плат электронных и сенсорных устройств, токопроводящих покрытий, оптических кристаллов и хемосенсоров. Используемый в настоящей работе способ обработки поверхностей металлов и сплавов лазерным излучением является перспективным для управления процессами, протекающими на границе раздела жидкость / газ / твердое тело.

Целью настоящей работы являлся анализ влияния обработки лазерным излучением поверхности широко применяемого в промышленности алюминий-магниевого сплава на образование слоя частиц при испарении капель коллоидных растворов.

Поверхности образцов обрабатывались двумя способами — галтовкой и наносекундными лазерными импульсами. Геометрические параметры испаряющихся с поверхностей образцов капель коллоидных растворов определялись по теневой методике. Для обработки полученных теневых изображений использовался метод Юнга — Лапласа. Фотоизображения образовавшихся при испарении капель коллоидных растворов слоев частиц получены с помощью сканирующего электронного микроскопа.

В результате проведения экспериментов установлено влияние образованной на поверхности образца алюминий-магниевого сплава текстуры на морфологию слоя полистирольных наночастиц при испарении капель коллоидных растворов: в результате «самосборки» частиц образуются твердые осадки в виде вытянутых под действием капиллярной силы параллельно вектору движения луча лазера (при нанесении текстуры) колец. При испарении растворителя из капли раствора на текстурированной поверхности помимо кольца образовывался однородный слой полистирольных частиц. Установлено, что с ростом концентрации частиц в растворе увеличиваются размеры радиально-направленных трещин на образованных в результате отложения частиц кольцах. При относительно малой объемной концентрации частиц трещины на кольцах не зарегистрированы.

Ключевые слова

Испарение, капля, коллоидный раствор, обработка лазерным излучением, полистирольная частица.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-26-43

Введение

Исследование процесса образования на поверхности твердого тела осадочных структур при испарении коллоидных растворов является актуальной задачей как с фундаментальной, так и прикладной точки зрения [8]. В ряде технологических подходов функциональное покрытие наносится в виде капель растворов микронных и субмикронных частиц органической или неорганической природы [8]. После испарения из капли растворителя на поверхности подложки остается слой частиц [5]. Капельные технологии используются для энергоэффективного

производства искусственных фотонных кристаллов, являющихся альтернативой природным фотонным кристаллам (опалам), которые сформировались в результате «самосборки» частиц диоксида кремния вследствие геологических процессов [8]. Еще одно направление исследований связано с развитием технологии капельного охлаждения [2]. Так, в исследовании [9] добавление в дистиллированную воду наночастиц Si/Ag (0,006% от общей массы получившегося раствора) привело к увеличению скорости испарения капель раствора с поверхности твердого тела на 55,5% в сравнении со скоростью испарения капли дистиллированной воды в аналогичных условиях.

Возникающий при испарении капли коллоидного раствора с поверхности твердого тела эффект «самосборки» частиц в твердый осадок определенной морфологии может стать основополагающим для энергоэффективного производства изделий электроники [19], оптики [10], фотоники [16] и др. Из-за широкого спектра возможного применения разрабатываемой теории интерес ученых направлен на поиск эффективных способов управления описанным выше процессом.

Одним из факторов, влияющих на морфологию сформированного с помощью капельной технологии слоя частиц, является состояние подложки, с которой испаряется капля коллоидного раствора: шероховатость поверхности, химический состав поверхностных слоев [8]. Для изменения поверхностных свойств материала, из которого изготавливается подложка, достаточно изменить свойства его поверхностных слоев толщиной несколько нанометров [1]. В результате процесса «самосборки» частиц при испарении растворителя из капель коллоидных растворов на поверхностях твердых тел образуются однослойные (кольцо, диск) или многослойные (например, «колпачок» [13]) структуры. Увеличение шероховатости поверхности подложки приводит к уменьшению скорости движения частиц вблизи границы жидкость / твердое тело при перемещении радикальных потоков жидкости в капле. В результате образуется структура с равномерным распределением частиц (диск) [7]. Стоит отметить, что осадки правильной геометрической формы образуются только на предварительно очищенной от возможных загрязнений поверхности [6].

Лазерная обработка — перспективный способ направленного регулирования поверхностных свойств металлов и сплавов для управления процессом «самосборки» частиц при испарении капель коллоидных растворов. После лазерной обработки на поверхности подложки формируется состоящая из микро- и наноразмерных элементов текстура [3]. Длительное хранение модифицированных подложек в воздушной среде приводит к снижению их свободной поверхностной энергии и, как следствие, к появлению гидрофобных или даже супергидрофобных свойств [14]. Значительно ускорить (от нескольких месяцев до нескольких часов) инверсию свойств смачиваемости можно за счет нанесения гидрофобизирующего покрытия или низкотемпературного нагрева в печи [12, 17]. Но промышленное применение способа первичной модификации поверхности подложек воздействием лазерного излучения и последующего нанесения функционального покрытия

в виде капель растворов микронных и субмикронных частиц сдерживается из-за отсутствия теории, описывающей характеристики процессов, происходящих на линии трехфазного контакта жидкость / газ / твердое тело при взаимодействии капель растворов с обработанными лазерным излучением поверхностями. В связи с этим целью настоящей работы являлся анализ влияния обработки лазерным излучением поверхности широко применяемого в промышленности алюминий-магниевого сплава на закономерности формирования осадков при испарении капель коллоидных растворов.

Методы исследования

Эксперименты с каплями проводились на установке, в основе работы которой лежит теневая методика (рис. 1). Источник света (1) освещал лежащую на поверхности образца (2) каплю коллоидного раствора (3). Ее теневое изображение регистрировалось видеокамерой FastVideo 500M (FastVideo, Россия) (4). Уровень серого и размер кадра изменялись в программе XnView (XnSoft, Франция). Геометрические параметры капель (объем, контактный угол (θ , °), контактный диаметр (D , мм)) определены по их теневым фотоизображениям в программе DropShapeAnalyses (Kruss, Германия) методом LB-ADSA (известный как метод Юнга — Лапласа). Последний основан на подборе членов дифференциального уравнения Юнга — Лапласа для описания формы капли по ее теневому фотоизображению. Погрешность метода определения геометрических параметров капель не превышала 5%. Капли коллоидного раствора полистирольных частиц с -COOH группой в поверхностном слое диаметром 100 нм (НЦ Ленхром, Россия) дозировались на поверхность образца электронным дозатором (Ленпипет, Россия) с инструментальной погрешностью $\pm 0,01$ мкл. Объемная концентрация частиц в растворе варьировалась от 0,025 до 1,0%. Сила тяжести не влияла на движение полистирольных частиц в капле раствора, т. к. разница плотностей воды ($1\,000\text{ кг/м}^3$) и частицы ($1\,050\text{ кг/м}^3$) пренебрежимо мала [13]. Относительная влажность и температура в помещении лаборатории во время проведения экспериментов варьировались от 20 до 30% и от 20 до 25 °C соответственно.

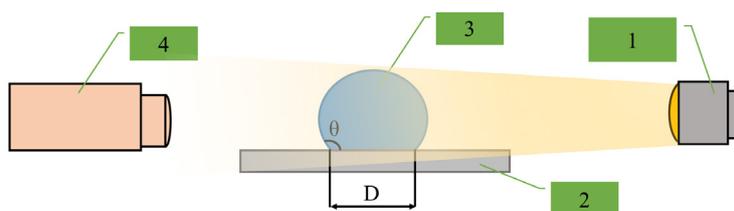


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — источник направленного света; 2 — образец алюминий-магниевого сплава; 3 — капля коллоидного раствора; 4 — видеокамера

Fig. 1. Scheme of the experimental setup: 1 — source of plane-parallel light; 2 — sample of aluminum-magnesium alloy; 3 — droplet of colloidal solution; 4 — video camera

В экспериментах использованы два образца широко применяемого в промышленности (в частности, в энергетике) алюминиево-магниевого сплава АМг6. Поверхности образцов обрабатывались двумя способами: механическая полировка и обработка лазерными импульсами. Первый образец полировался в галтовочном центробежном станке ОТЕС CF 50 Element (Германия) с использованием галтовочного наполнителя ОТЕС Н1-100 из ореховой скорлупы и пасты ГОИ № 1 (Россия). Обработка поверхности второго образца выполнялась одиночными лазерными импульсами длительностью 200 нс при средней выходной мощности 20 Вт, частоте излучения 20 кГц с помощью лазерной установки МиниМаркер 2 М20 (Laser Center, Россия). Последняя включала иттербиевый импульсный наносекундный волоконный лазер IPG-Photonics (ИРЭ-Полус, Россия) с длиной волны 1 064 нм. Скорость перемещения луча (мм/с) и количество штрихов на миллиметр (1/мм) составили 1 000 мм/с и 20 1/мм соответственно. Перед нанесением текстуры поверхность образца выравнивалась на шлифовально-полировальном станке Grinding Polishing Machine MP1B (Китай). Последнее связано с необходимостью минимизации возможного возникновения влияющих на процессы рассеяния света поверхностных электромагнитных волн [4]. После лазерной обработки образец хранился в воздушной среде более 6 месяцев для стабилизации свойств его смачиваемости.

Фотоизображения микротекстуры поверхностей образцов (рис. 2) и структуры образовавшихся в результате испарения капель коллоидных растворов твердых осадков получены с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM 3000 (Япония) с высокочувствительным полупроводниковым детектором обратно рассеянных электронов (BSE) с ускоряющим напряжением 15 кВ.

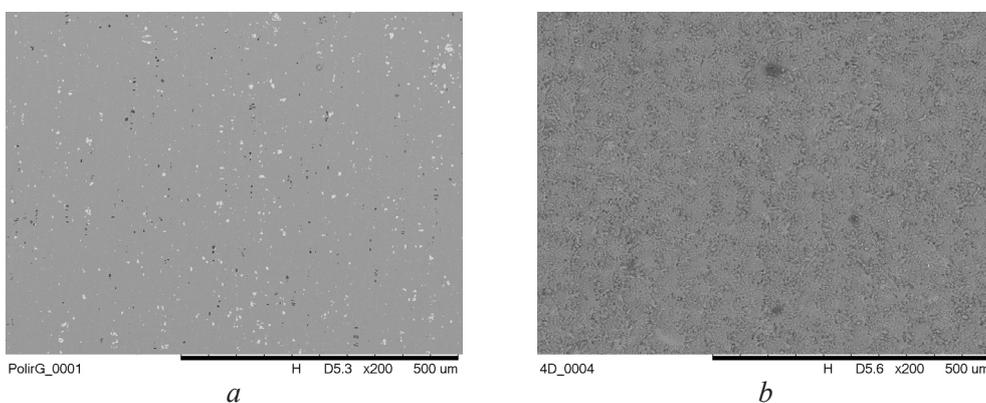


Рис. 2. Фотоизображения микроструктуры поверхностей образцов: *a* — полированный; *b* — обработанный лазерным излучением

Fig. 2. Photographs of the microstructure of the samples' surfaces: *a* — polished; *b* — laser-textured

Шероховатость поверхностей образцов характеризовалась средним арифметическим отклонением профиля Ra (мкм), определенного с помощью контактного профилометра HOMMEL-ETAMIC T1000 (Германия). Для измерения шероховатости выбраны три произвольных направления движения щупа профилометра по поверхности образцов. Инструментальная погрешность профилометра не превышала 5%. Элементный состав материалов поверхностных слоев образцов определен с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-7500FA (Япония), оснащенного системой EDS JED 2300.

Результаты и обсуждения

В результате механической полировки и обработки лазерным излучением поверхностей алюминий-магниевого сплава получены два образца (фотоизображения микротекстуры их поверхностей представлены на рис. 2). После полировки в барабане галтовочного станка поверхность алюминий-магниевого сплава проявляла гидрофильные свойства (контактный угол $82 \pm 1^\circ$). Уменьшение шероховатости поверхности в результате движения полировальных смесей по поверхности образца приводило к существенному снижению Ra от $0,20 \pm 0,01$ мкм (необработанный образец) до $0,0016 \pm 0,005$ мкм (полированный в барабане галтовочного станка). При механической обработке поверхностей металлов и сплавов изменяются как рельеф, так и состав материалов приповерхностных слоев в результате вдавливания частиц абразива, попадания в каверны полировальных паст, нагрева металла трением и др. Поэтому в настоящей работе определены не только параметры шероховатости, но и химические составы материалов приповерхностных слоев (рис. 3). В результате механической полировки образцов в барабане галтовочного станка доля кремния уменьшилась с 7,4 до 0%, доля кислорода — с 27,8 до 0,6%.

После обработки лазерным излучением на поверхности образца сформировалась многомодальная текстура. Параметры шероховатости текстуры (образовавшейся при воздействии лазерным излучением с описанными выше параметрами) (рис. 2b) не могут быть определены контактным профилометром с удовлетворительной точностью. Среднее арифметическое отклонение профиля составило более 1,75 мкм.

В результате обработки поверхности сплава лазерным излучением и его последующего хранения в воздушной среде доля кремния в поверхностном слое уменьшилась с 7,4 до 0,5%, доля кислорода, наоборот, увеличилась от 27,8 до 33,4% (рис. 3). При кратковременном контакте (менее 5 секунд) капли воды и растворов скатывались с обработанной лазерным излучением поверхности образца или оставались на кончике дозирующего устройства — поверхность характеризовалась супергидрофобными свойствами. При продолжительном контакте с водой и растворами адгезия между жидкостью и поверхностью твердого тела увеличивалась из-за проникновения жидкости в микронеровности. При этом поверхность образца становилась гидрофобной (контактный угол $145 \pm 2^\circ$). Стоит отметить, что добавление в воду частиц полистирола не влияло на характеристики процесса смачивания поверхности образцов каплями растворов [13].

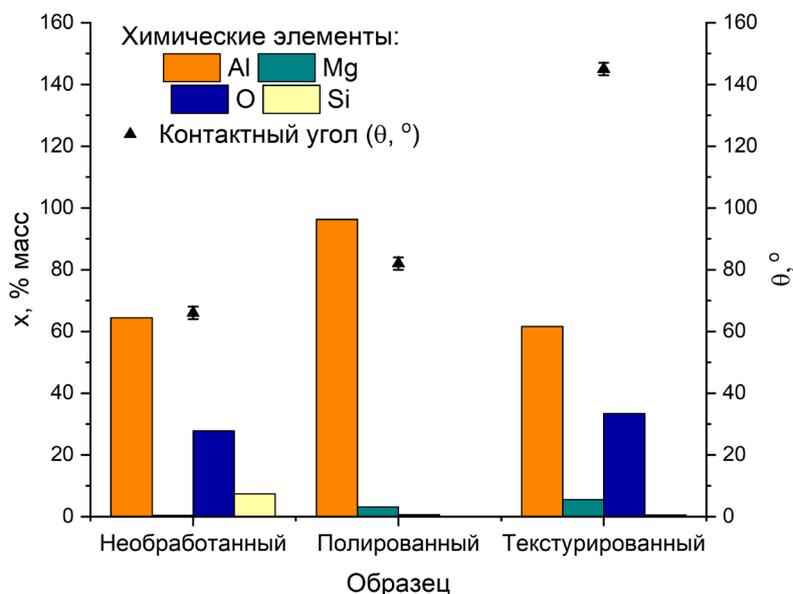


Рис. 3. Химические составы материалов приповерхностных слоев и контактные углы при смачивании каплями воды необработанного, полированного и обработанного лазерным излучением образцов алюминиево-магниевого сплава

Fig. 3. Elemental composition samples' surfaces and contact angles formed by water droplets and samples' surfaces: unprocessed, polished and laser-textured aluminum-magnesium alloy

Анализируя рис. 3, можно сделать вывод об отсутствии явной зависимости контактных углов, образованных каплями воды на поверхностях образцов, от химического состава. Последний является усредненным значением, но распределение элементов по поверхности образцов может быть произвольным, что, в свою очередь, существенно влияет на величину контактного угла.

Выделены режимы испарения капель воды с обработанных полировкой и лазерным излучением поверхностей алюминиево-магниевого сплава. При испарении капель воды с полированного образца зарегистрированы три режима: режим с постоянным контактным диаметром (при испарении капли с поверхности твердого тела происходит уменьшение контактного угла без уменьшения контактного диаметра), режим с постоянным контактным углом (уменьшение контактного диаметра без уменьшения контактного угла) и смешанный (контактный угол и контактный диаметр уменьшаются). При испарении капли воды с обработанной лазерным излучением поверхности образца режим с постоянным контактным диаметром регистрировался более 90% от общего времени испарения, затем наступал смешанный режим. Последнее объясняется тем, что при взаимодействии капли воды с шероховатой обработанной лазерным излучением поверхностью образца жидкость проникала в каверны. Увеличивалась необходимая на отступление контактной линии капли энергия (затрачиваемая на преодоление энергетических

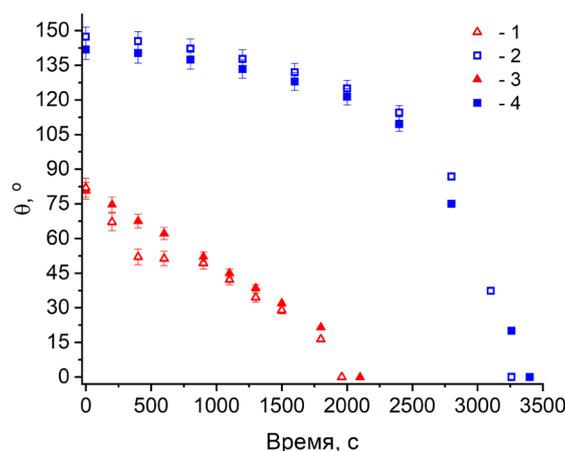


Рис. 4. Зависимости контактных углов от времени испарения капель воды с полированной (1) и текстурированной (2) поверхностей образцов и капель растворов с полированной (3) и текстурированной (4) поверхностей образцов

Fig. 4. Dependencies of the contact angles on the evaporation time of water from polished (1) and textured (2) surfaces of samples and solution droplets from polished (3) and textured (4) surfaces of samples

барьеров — выступов и впадин на поверхности образца). Зависимости контактных углов от времени испарения капель воды и раствора с полированной и обработанной лазерным излучением поверхностей образцов представлены на рис. 4. Зависимости контактных диаметров от времени испарения не представлены, т. к. большую часть времени капли воды испарялись с постоянным контактным диаметром.

При испарении капель коллоидных растворов с полированной и обработанной лазерным излучением поверхностей образцов зарегистрированы два режима испарения: режим с постоянным контактным диаметром и смешанный режим испарения. Добавление в воду частиц полистирола привело к увеличению времени пиннинга контактной линии капель водных растворов. Последнее объясняется увеличением адгезии между поверхностью твердого тела и жидкостью из-за образующихся на линии трехфазного контакта жидкость / газ / твердое тело колец (рис. 5).

При испарении капли раствора с полированной галтовкой поверхности образца (характеризующейся относительно малым $Ra = 0,016 \pm 0,005$ мкм), образовывались радиально-симметричные кольца (рис. 5a). Последнее обусловлено пиннингом контактной линии капли раствора. При испарении капли раствора в режиме с постоянным контактным диаметром возникали компенсационные радиально направленные потоки, которые увлекали растворенные в воде полистирольные частицы к границе капли [8]. Диаметры образующихся при испарении капель коллоидных растворов колец не зависели от концентрации полистирольных частиц. Последнее объясняется тем, что добавление частиц в воду не приводит к изменению ее поверхностного натяжения [13].

После дозирования на обработанную лазерным излучением поверхность образца капли растворов вытягивались параллельно вектору движения луча лазера (при нанесении текстуры) под действием капиллярной силы. Разница между измеренными параллельно и перпендикулярно вектору движения луча лазера размерами осадка составила 110 ± 5 мкм (рис. 5b). Такой же эффект (растекание капли параллельно канавкам под действием капиллярной силы) зарегистрирован в [11] при испарении капли раствора полистирольных частиц с супергидрофобной поверхности образца.

Анализ полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа фотоизображений твердых осадков на обработанной лазерным излучением поверхности образца (рис. 5b) показал, что при испарении растворителя из капли раствора помимо кольца образуется слой полистирольных частиц. При длительном контакте обработанной лазерными импульсами поверхности образца с водой (более 5-10 секунд) режим смачивания меняется с гетерогенного на гомогенный. Оставшиеся в кавернах пузырьки газа разрушаются. В условиях гомогенного режима смачивания при испарении капли раствора с обработанной лазерным излучением поверхности образца скорость радиально направленных потоков жидкости с частицами уменьшается вблизи границы раздела жидкость / твердое тело из-за каверн и выступов, формирующих текстуру поверхности образца. Частицы осаждаются в кавернах. Последнее нехарактерно для испарения капли коллоидного раствора с условно гладкой поверхности полированного образца.

С ростом объемной концентрации от 0,025 до 0,1% образовавшийся на обработанной лазерным излучением поверхности образца слой частиц становится более однородным. Дальнейшее увеличение объемной концентрации раствора до 0,2% приводит к растрескиванию слоя и удалению части осажденных частиц из каверн. Кроме того, как в случае полированного, так и обработанного лазерным излучением образцов с ростом концентрации частиц в растворе увеличиваются размеры радиально-направленных трещин на образованных в результате «самосборки» частиц кольцах (рис. 6 и рис. 7).

Известно [15, 16], что трещины образуются при испарении коллоидного раствора с частицами диаметром 100 мкм и меньше. Растрескивание кольца происходит на финальной стадии испарения [15, 16]. Из-за осаждения частиц на границе жидкость / газ / твердое тело концентрация раствора на периферии капли существенно возрастает. Раствор проявляет свойства геля. При испарении в режиме пиннинга капля раствора накапливает энергию, достаточную для начала движения контактной линии, что приводит к появлению сжимающих напряжений. Кольцо из осажденных частиц на периферии капли раствора препятствует ее сжатию. В результате испарения растворителя из капли образуются трещины из-за накопленной энергии упругой деформации. В случае объемной концентрации частиц в растворе 0,005% растрескивание колец на полированной и обработанной лазерным излучением поверхностях образцов не зарегистрировано.

На рис. 8 представлена зависимость ширины образовавшихся на поверхностях образцов колец от начальной концентрации полистирольных частиц в растворе.

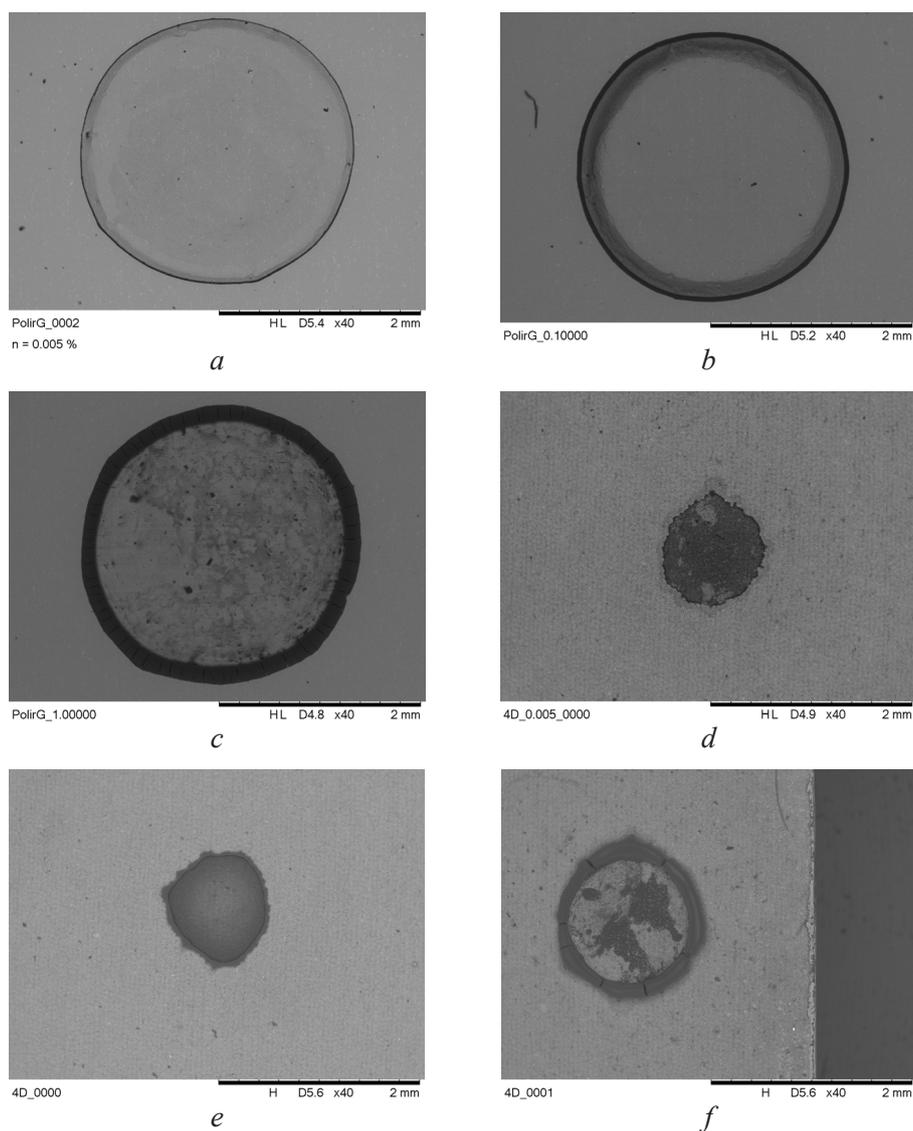


Рис. 5. Типичные фотоизображения образовавшихся при испарении капли раствора полистирольных частиц твердых осадков: на полированной поверхности образца с объемной концентрацией частиц в растворе: *a* — 0,025%; *b* — 0,1%; *c* — 1,0%; на обработанной лазерным излучением поверхности образца с объемной концентрацией частиц в растворе: *d* — 0,025%; *e* — 0,1%; *f* — 1,0%

Fig. 5. Typical images of patterns formed during droplet evaporation of the solution of polystyrene particles: on a polished sample with a solution concentration: *a* — 0.025%; *b* — 0.1%; *c* — 1.0%; on the sample textured by laser radiation with a solution concentration: *d* — 0.025%; *e* — 0.1%; *f* — 1.0%

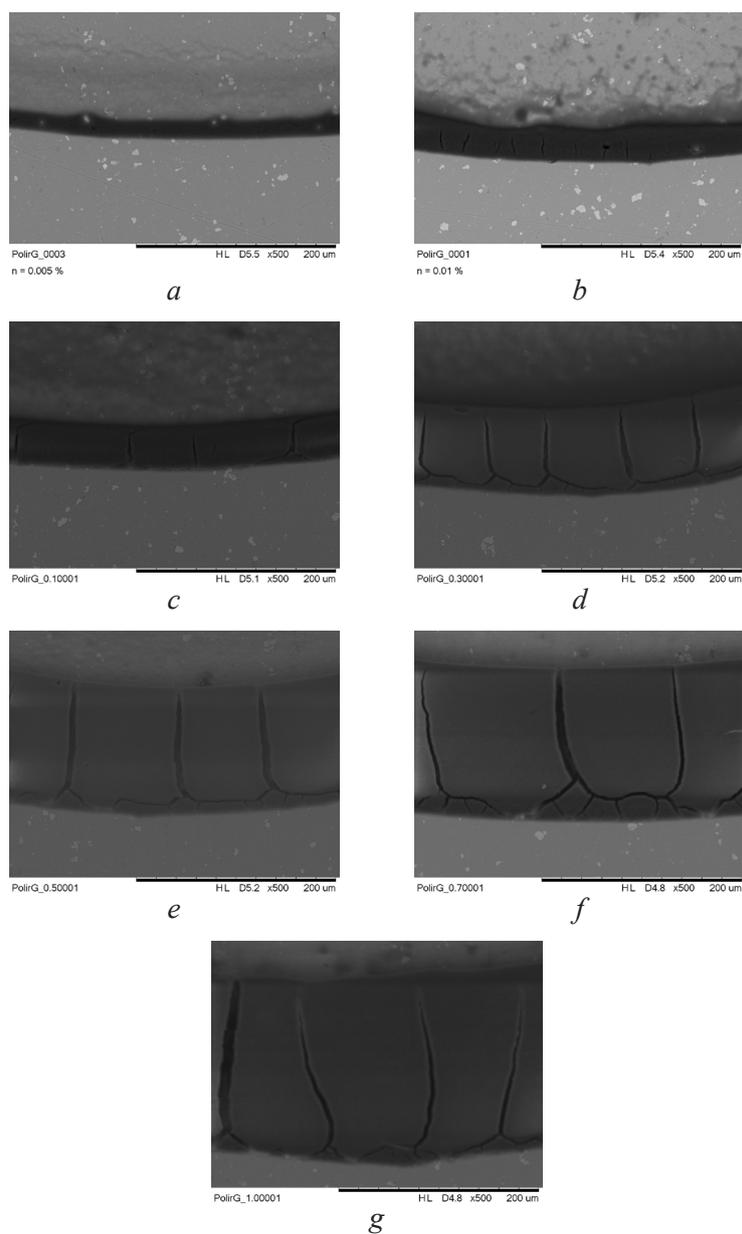


Рис. 6. Фотоизображения фрагментов колец, образовавшихся при испарении капель коллоидного раствора с полированной поверхности образца при объемной концентрации раствора: *a* — 0,025%; *b* — 0,05%; *c* — 0,1%; *d* — 0,3%; *e* — 0,5%; *f* — 0,7%; *g* — 1,0%

Fig. 6. The photographs of ring fragments formed during evaporation of colloidal solution droplets from the polished sample at a solution concentration: *a* — 0.025%; *b* — 0.05%; *c* — 0.1%; *d* — 0.3%; *e* — 0.5%; *f* — 0.7%; *g* — 1.0%

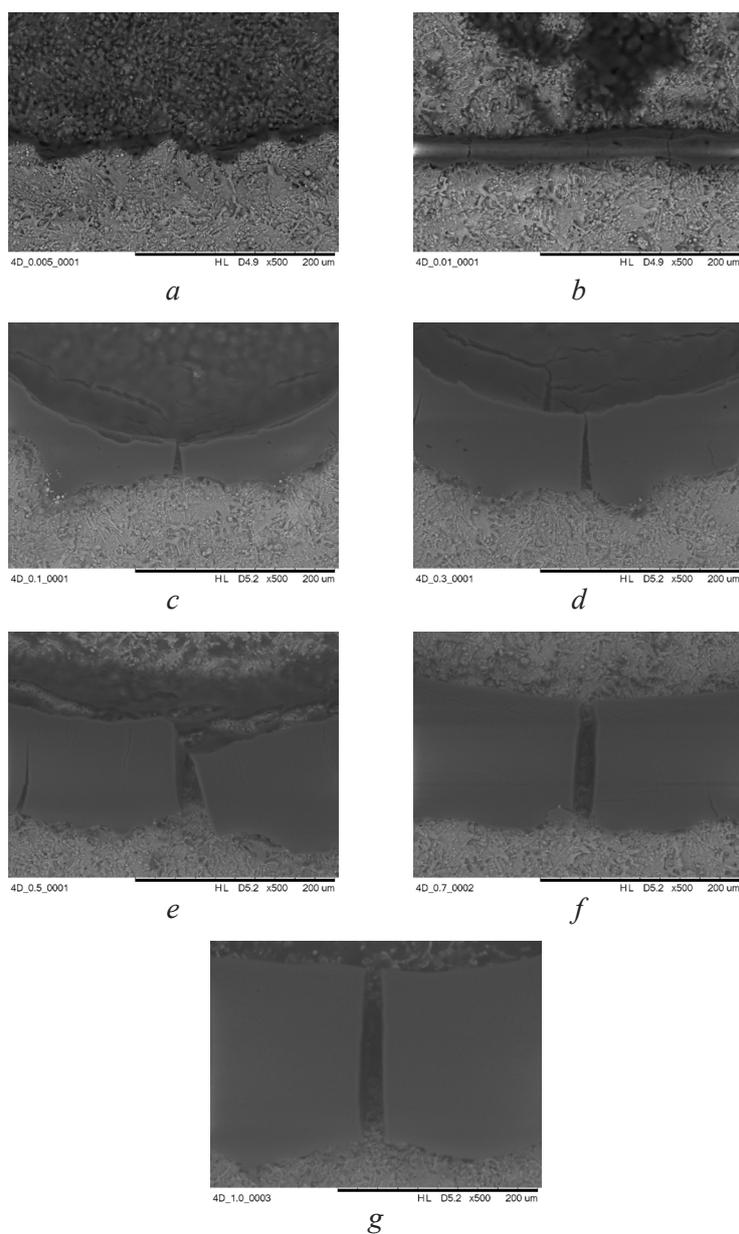


Рис. 7. Фотоизображения фрагментов колец, образовавшихся при испарении капель коллоидного раствора с текстурированной поверхности образца при объемной концентрации раствора: *a* — 0,025%; *b* — 0,05%; *c* — 0,1%; *d* — 0,3%; *e* — 0,5%; *f* — 0,7%; *g* — 1,0%

Fig. 7. The photographs of ring fragments formed during evaporation of colloidal solution droplets from the sample textured by laser radiation at a solution concentration: *a* — 0.025%; *b* — 0.05%; *c* — 0.1%; *d* — 0.3%; *e* — 0.5%; *f* — 0.7%; *g* — 1.0%

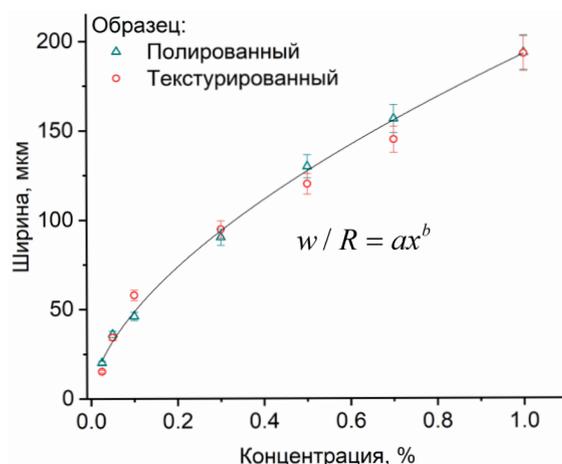


Рис. 8. Зависимости толщины образующихся при испарении капель коллоидных растворов колец от концентрации частиц в растворе

Fig. 8. The dependences of thickness of the rings formed during evaporation of colloidal solution droplets on the concentration of particles in the solution

Степенные зависимости ширины образовавшихся на полированной и текстурированной поверхностях образцов колец (w , мкм) от концентрации частиц в растворе описываются уравнением $w/R = ax^b$, где R — радиус частицы (0,05 мкм), x — начальная концентрация раствора, % [20]. Коэффициенты a и b составили $2,6 \cdot 10^3$ и 0,6 соответственно. Известно [18], что при испарении капель растворов равных объемов с поверхностей твердых тел в режиме пиннинга контактной линии геометрические параметры образовавшихся колец зависят только от концентрации частиц в растворе. В настоящей работе капли растворов испарялись с поверхностей образцов в режиме пиннинга контактной линии более 90% от общего времени испарения. Появление гидрофобных свойств после обработки поверхности алюминиево-магниевого сплава лазерным излучением не привело к изменению доминирующего режима испарения. Концентрация полистирольных частиц около неподвижной линии трехфазного контакта и, следовательно, толщина кольца увеличивались в результате выпаривания из капли растворителя на периферии капли и не зависели от начального контактного угла. Следовательно, способ обработки поверхности образца не влиял на ширину кольца.

Заключение

Проведенные исследования показали возможность регулирования структуры твердых осадков (образующихся в результате «самосборки» полистирольных частиц при испарении капель коллоидных растворов объемной концентрацией 0,025-1,0%) при обработке поверхности алюминиево-магниевого сплава лазерным излучением. Установлено, что в результате «самосборки» частиц при испарении капель раствора образуются твердые осадки в виде колец. Способ обработки

поверхности образца не влиял на ширину кольца. На обработанной лазерным излучением поверхности образца образовывались вытянутые под действием капиллярной силы параллельно вектору движения луча лазера (при нанесении текстуры) осадки. При испарении растворителя из капли раствора на текстурированной поверхности помимо кольца образовался однородный слой полистирольных частиц (при испарении капли раствора объемной концентрацией 0,1%). Установлено, что с ростом концентрации частиц в растворе увеличиваются размеры радиально-направленных трещин на образованных в результате «самосборки» частиц кольцах. При относительно низкой объемной концентрации частиц 0,025% трещины на кольцах не зарегистрированы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойнович Л. Б. Супергидрофобные покрытия — новый класс полифункциональных материалов / Л. Б. Бойнович // Вестник Российской академии наук. 2013. Том 83. № 1. С. 10-22.
2. Дмитриев А. С. Об испарении жидкости из капель коллоидных растворов наночастиц SiO_2 и Fe_2O_3 / А. С. Дмитриев, П. Г. Макаров // Коллоидный журнал. 2015. Том 77. № 2. С. 144-151.
3. Домантовский А. Г. Текстурированные материалы с экстремальным смачиванием для сбора воды из аэрозолей / А. Г. Домантовский, А. М. Емельяненко, Л. Б. Бойнович // Доклады академии наук: физическая химия. 2019. Том 489. № 5. С. 478-482.
4. Климков Ю. М. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / Ю. М. Климков, В. С. Майоров, М. В. Хорошев. М: МИИГАиК, 2014. 108 с.
5. Молчанов С. П. Три сценария испарения микролитровых капель дисперсий и структура формирующихся кольцевых осадков / С. П. Молчанов, В. И. Ролдугин, И. А. Чернова-Хараева // Коллоидный журнал. 2015. Том 77. № 6. С. 764-774.
6. Молчанов С. П. Факторы, определяющие динамику формирования и структуру кольцевых осадков, образующихся при капиллярной самосборке частиц / С. П. Молчанов, В. И. Ролдугин, И. А. Чернова-Хараева, Г. А. Юрасик, И. Н. Сенчихин // Коллоидный журнал. 2018. Том 80. № 1. С. 63-77.
7. Назаров В. Г. Модифицированные полимерные подложки для формирования ансамблей субмикронных частиц из коллоидного раствора / В. Г. Назаров, В. П. Столяров // Коллоидный журнал. 2016. Том 78. № 1. С. 59-67.
8. Степанов-Лебедев П. В. Самосборка наночастиц в микрообъеме коллоидного раствора: физика, моделирование, эксперимент / П. В. Степанов-Лебедев, Р. М. Кадушников, С. П. Молчанов и др. // Российские нанотехнологии. 2013. Том 8. № 3-4. С. 5-23.
9. Amjad M. Deposition pattern and tracer particle motion of evaporating multi-component sessile droplets / M. Amjad, Y. Yang, G. Raza, H. Gao, J. Zhang, L. Zhou, X. Du, D. Wen // Journal of Colloid and Interface Science. 2017. Vol. 506. С. 83-92.
10. Fathi F. Investigation of optical and physical property in opal films prepared by colloidal and freeze-dried microspheres / F. Fathi, P. Chaghamirzaei, S. Allahveisi, S. Ahmadi-Kandjani, M. R. Rashidi // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021. Vol. 611. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.125842

11. Ghosh S. Three-dimensional microplate formation with evaporating nanoparticle suspensions on superhydrophobic surfaces / S. Ghosh // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2017. Vol. 529. Pp. 901-906.
12. He A. Nanosecond laser ablated copper superhydrophobic surface with tunable ultrahigh adhesion and its renewability with low temperature annealing / A. He, W. Liu, W. Xue, H. Yang, Y. Cao // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 434. Pp. 120-125.
13. Hu Y. Evaporation and particle deposition of bi-component colloidal droplets on a superhydrophobic surface / Y. Hu, B. Zhao, S. Lin, X. Deng, L. Chen // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 159. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120063
14. Long J. Superhydrophilicity to superhydrophobicity transition of picosecond laser microstructured aluminum in ambient air / J. Long, M. Zhong, H. Zhang, P. Fan // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2015. Vol. 441. Pp. 1-9.
15. Malla L. K. Analysis of profile and morphology of colloidal deposits obtained from evaporating sessile droplets / L. K. Malla, R. Bhardwaj, A. Neild // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019. Vol. 567. Pp. 150-160.
16. Malla L. K. Colloidal deposit of an evaporating sessile droplet on a non-uniformly heated substrate / L. K. Malla, R. Bhardwaj, A. Neild // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2020. Vol. 584. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.124009
17. Ngo C. V. Fast wettability transition from hydrophilic to superhydrophobic laser-textured stainless steel surfaces under low-temperature annealing / C. V. Ngo, D. M. Chun // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 409. Pp. 232-240.
18. Popov Yu. O. Evaporative Deposition Patterns: Spatial Dimensions of the Deposit / Yu. O. Popov // *Physical Review*. 2005. Vol. 71. P. 036313. DOI: 10.1103/PhysRevE.71.036313
19. Qin F. Controlled 3D nanoparticle deposition by drying of colloidal suspension in designed thin micro-porous architectures / F. Qin, M. Su, J. Zhao, et al. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 158. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120000
20. Wang W. On-demand contact line pinning during droplet evaporation / W. Wang, Q. Wang, K. Zhang, X. Wang, A. Riaud, J. Zhou // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2020. Vol. 312. DOI: 10.1016/j.snb.2020.127983

Ksenia A. BATISHCHEVA¹
Yuliya N. VYMPINA²
Evgeniya G. ORLOVA³

UDC 532.64

**THE INFLUENCE OF LASER TREATMENT
OF ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOY SURFACE
ON THE “SELF-ASSEMBLY” OF NANOPARTICLES
DURING THE EVAPORATION OF COLLOIDAL SOLUTION***

¹ Postgraduate Student, Engineer, Butakov Research Center,
School of Energy and Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University
bka1801@mail.ru; ORCID: 0000-0002-2810-6769

² Postgraduate Student, Engineer, Division for Power and Electrical Engineering,
School of Energy and Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University
ynp2@tpu.ru

³ Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Lecturer, Butakov Research Center,
School of Energy and Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University
lafleur@tpu.ru

Abstract

Establishing the characteristics of the self-assembly of micron and sub-micron particles when colloidal solution droplets evaporate from solid surfaces is an urgent problem. This is explained by the possibility of using these structures obtained by droplet technologies to create and optimize the production of direct and indirect liquid cooling devices, electronic and sensor working boards, current-conducting coatings, optical crystals, and chemo sensors. The method used in this study for processing of metals and alloys by laser radiation is prospective for controlling the processes at the liquid/gas/solid interface.

* This research was supported by the RFBR (grant No. 20-38-90027).

Citation: Batishcheva K. A., Vympina Yu. N., Orlova E. G. 2021. “The influence of laser treatment of aluminum-magnesium alloy surface on the ‘self-assembly’ of nanoparticles during the evaporation of colloidal solution”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 7, no. 1 (25), pp. 26-43.
DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-26-43

This article aims to analyze the effect of laser processing of the widely used in the industry aluminum-magnesium alloy on the formation of a layer of particles during the droplet evaporation of colloidal solutions. The samples' surfaces were processed by two methods: polished by tumbling and nanosecond laser pulses. The geometric parameters of the droplets of colloidal solutions evaporating from the samples' surfaces were determined by the shadow method. To process the obtained shadow images, the Young — Laplace method was used. Using a scanning electron microscope, the authors have received the images of the particles' layers formed due to the droplet evaporation of colloidal solutions.

The experimental studies reveal the effect of texture formed on aluminum-magnesium alloy sample on the morphology of the layer of polystyrene nanoparticles during the droplet evaporation of colloidal solutions. Due to the self-assembly of particles, solid ring-like sediments are formed, which are elongated under the action of the capillary force parallel to the motion vector of the laser beam (when creating the texture). When the solvent evaporated from the solution droplet on the textured surface, in addition to the rings, a homogeneous layer of polystyrene particles was formed. This refers to the droplet evaporation of the solution.

The results show that with an increase in the concentration of particles in the solution, the sizes of radial cracks on the rings formed due to particle deposition increase. There were no cracks on the rings at a relatively low volume concentration of particles.

Keywords

Evaporation, droplet, colloidal solution, laser processing, polystyrene particle.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-26-43

REFERENCES

1. Boynovich L. B. 2013. "Superhydrophobic coatings — a new class of polyfunctional materials". *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, vol. 83, no. 1, pp. 10-22. [In Russian]
2. Dmitriyev A. S., Makarov P. G. 2015. "On the evaporation of liquid from drops of colloidal solutions of SiO₂ and Fe₂O₃ nanoparticles". *Kolloidnyy Zhurnal*. vol. 77, no. 2, pp. 144-151. [In Russian]
3. Domantovskiy A. G., Yemelyanenko A. M., Boynovich L. B. 2019. "Textured materials with extreme wetting for collecting water from aerosols". *Doklady akademii nauk, Fizicheskaya khimiya*, vol. 489, no. 5, pp. 478-482. [In Russian]
4. Klimkov Yu. M., Mayorov V. S., Khoroshev M. V. 2014. *Interaction of Laser Radiation with Matter*. Moscow: RF Ministry of Education and Science Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossiyskoy Federatsii; Moscow State University of Geodesy and Cartography. 108 pp. [In Russian]
5. Molchanov S. P., Roldugin V. I., Chernova-Kharayeva I. A. 2015. "Three scenarios of evaporation of microliter droplets of dispersions and the structure of forming ring sediments". *Kolloidnyy Zhurnal*, vol. 77, no. 6, pp. 764-774. [In Russian]
6. Molchanov S. P., Roldugin V. I., Chernova-Kharayeva I. A., Yurasik G. A., Senchikhin I. N. 2018. "Factors determining the dynamics of formation and structure of annular sediments formed during the capillary self-assembly of particles". *Kolloidnyy Zhurnal*, vol. 80, no. 1, pp. 63-77. [In Russian]

7. Nazarov V. G., Stolyarov V. P. 2016. "Modified polymer substrates for the formation of ensembles of submicron particles from a colloidal solution". *Kolloidnyy Zhurnal*, vol. 78, no. 1, pp. 59-67. [In Russian]
8. Stepanov-Lebedev P. V., Kadushnikov R. M., Molchanov S. P., Ivanov A. A., Mitrokhin V. P., Vlasov K. O., Rubin N. A., Yurasik G. A., Nazarov V. G., Alfimov M. V. 2013. "Self-assembly of nanoparticles in the microvolume of a colloidal solution: physics, modeling, experiment". *Rossiyskiye nanotekhnologii*, vol. 8, no. 3-4, pp. 5-23. [In Russian]
9. Amjad M., Yang Y., Raza G., Gao H., Zhang J., Zhou L., Du X., Wen D. 2017. "Deposition pattern and tracer particle motion of evaporating multi-component sessile droplets" *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 506, pp. 83-92.
10. Fathi F., Chaghmirzaei P., Allahveisi S., Ahmadi-Kandjani S., Rashidi M. R. 2021. "Investigation of optical and physical property in opal films prepared by colloidal and freeze-dried microspheres". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 611, art. 125842. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.125842
11. Ghosh S. 2017. "Three-dimensional microplate formation with evaporating nanoparticle suspensions on superhydrophobic surfaces". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 529, pp. 901-906.
12. He A., Liu W., Xue W., Yang H., Cao Y. 2018 "Nanosecond laser ablated copper superhydrophobic surface with tunable ultrahigh adhesion and its renewability with low temperature annealing". *Applied Surface Science*, vol. 434, pp. 120-125.
13. Hu Y., Zhao B., Lin S., Deng X., Chen L. 2020. "Evaporation and particle deposition of bi-component colloidal droplets on a superhydrophobic surface". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 159, art. 120063. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120063
14. Long J., Zhong M., Zhang H., Fan P. 2015 "Superhydrophilicity to superhydrophobicity transition of picosecond laser microstructured aluminum in ambient air". *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 441, pp. 1-9.
15. Malla L. K., Bhardwaj R., Neild A. 2019. "Analysis of profile and morphology of colloidal deposits obtained from evaporating sessile droplets". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 567, pp. 150-160.
16. Malla L. K., Bhardwaj R., Neild A. 2020 "Colloidal deposit of an evaporating sessile droplet on a non-uniformly heated substrate". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 584, art. 124009. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.124009
17. Ngo C. V., Chun D. M. 2017. "Fast wettability transition from hydrophilic to superhydrophobic laser-textured stainless steel surfaces under low-temperature annealing". *Applied Surface Science*, vol. 409, pp. 232-240.
18. Popov Yu. O. 2005. "Evaporative Deposition Patterns: Spatial Dimensions of the Deposit". *Physical Review*, vol. 71, p. 036313. DOI: 10.1103/PhysRevE.71.036313
19. Qin F., Su M., Zhao J., Moqaddam A. M., Carro L. D., Brunswiler T., Kang Q., Song Y., Derome D., Carmeliet J. 2020. "Controlled 3D nanoparticle deposition by drying of colloidal suspension in designed thin micro-porous architectures". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 158, art. 120000. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120000
20. Wang W., Wang Q., Zhang K., Wang X., Riaud A., Zhou J. 2020. "On-demand contact line pinning during droplet evaporation". *Sensors Actuators B: Chemical*, vol. 312, art. 127983. DOI: 10.1016/j.snb.2020.127983