

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

СОЗДАНИЕ ГИДРОФОБНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ (ОБЗОР)¹

© 2022 г. А. В. Рагуткин^{а, *}, М. Р. Дасаев^а, О. В. Калакуцкая^а, О. С. Зилова^а, Е. С. Трушин^а

^аМИРЭА – Российский технологический университет, просп. Вернадского, д. 78, Москва, 119454 Россия

*e-mail: dasaev@mirea.ru

Поступила в редакцию 11.08.2021 г.

После доработки 15.09.2021 г.

Принята к публикации 22.09.2021 г.

За последнее десятилетие возрос интерес к управлению смачиваемостью металлических поверхностей различными жидкостями. В частности, применение гидрофобных функциональных поверхностей способствует повышению эффективности и надежности теплоэнергетических установок и систем, эксплуатируемых в различных сферах жизнедеятельности. Одним из наиболее перспективных способов достижения гидрофобного состояния конструкционных материалов является модификация поверхности с использованием лазерного оборудования – лазерная абляция. В результате воздействия лазерного излучения происходит плавление, испарение и рекристаллизация поверхностного слоя металла. Варьируя параметры воздействия лазерного излучения, можно формировать на металлической поверхности рельеф с заданными геометрическими характеристиками. Создание гидрофобных металлических поверхностей с использованием лазерного оборудования включает следующие этапы: выбор типа лазерного источника, определение параметров излучения и траектории движения лазерного луча по поверхности, подготовку исходной поверхности, формирование рельефа, снижение поверхностной энергии после лазерной абляции. В настоящей работе представлен обзор результатов исследований по созданию гидрофобных металлических поверхностей на основе формирования структурированного рельефа. В большинстве исследований на поверхности металлических образцов формировался рельеф в виде равноудаленных линий, сетки или не имевший выраженной структуры (нерегулярная структура). Установлено, что гидрофобное состояние металлической поверхности с наиболее высокими углами смачивания (более 150°) достигается при лазерном текстурировании рельефа в виде равноудаленных линий или сетки с шагом, не превышающим 100 мкм. Максимальный угол смачивания (около 179°) получен при формировании рельефа в виде сетки с равноудаленными на 15 и 20 мкм взаимно перпендикулярными линиями.

Ключевые слова: лазерное текстурирование, лазерная абляция, металлические поверхности, рельеф, смачиваемость, гидрофобность, шероховатость поверхности, снижение поверхностной энергии

DOI: 10.1134/S0040363622050058

В связи с постоянным ростом потребности в тепловой и электрической энергии, получаемых при сжигании органического топлива, стоимость которого непрерывно увеличивается, необходимо повышать эффективность и надежность теплоэнергетических установок и систем, эксплуатируемых в различных сферах жизнедеятельности, в том числе в энергетике, нефтяной промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве. Поэтому актуальной задачей является разработка способов

снижения гидравлического сопротивления при транспортировке жидких сред, интенсификации теплообменных процессов при конденсации паров теплоносителя и парогазовых смесей, повышения коррозионной стойкости конструкционных материалов, а также различных мероприятий, способствующих уменьшению энергетических затрат при эксплуатации теплоэнергетического оборудования и увеличению его ресурса.

Анализ отечественных и зарубежных публикаций свидетельствует о том, что за последнее десятилетие возрос интерес исследователей к управлению смачиваемостью металлических поверхностей, контактирующих с жидкостями (функциональные поверхности). К настоящему

¹ Работа выполнена по теме “Проведение исследований в области повышения теплогидравлических характеристик и износостойкости функциональных поверхностей энергетического оборудования” при поддержке гранта РТУ МИРЭА.

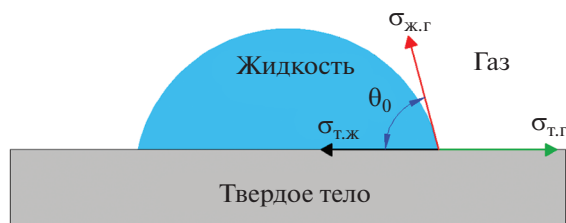


Рис. 1. Схематическое изображение угла смачивания

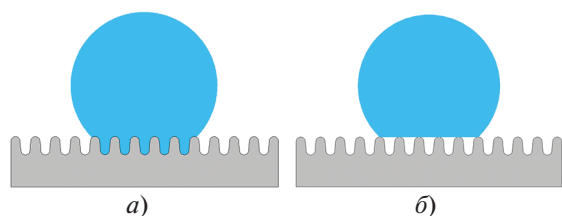


Рис. 2. Схематическое изображение состояний Венцеля (а) и Касси – Бакстера (б) при смачивании шероховатой поверхности

времени проведены комплексные исследования, которые показали, что при изменении смачиваемости внутренних поверхностей трубопроводов тепловых сетей и теплообменных аппаратов можно значительно снизить энергетические затраты на транспортировку теплоносителя, интенсифицировать процессы теплообмена, сделать более долговечными существующие и новые трубопроводные системы, увеличить их межремонтный период.

Смачиваемость – одна из основных характеристик твердой поверхности, которая проявляется в способности жидкости растекаться по ней. Степень смачиваемости, как правило, определяется краевым углом смачивания θ_0 , вершина которого расположена в трехфазной точке контакта, а сам угол образуется между касательной к профилю капли и твердой поверхностью (рис. 1). Значение краевого угла смачивания на атомарно плоской и химически однородной поверхности рассчитывается по уравнению Т. Юнга [1]:

$$\cos\theta_0 = \frac{\sigma_{т,г} - \sigma_{т,ж}}{\sigma_{ж,г}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{т,г}$, $\sigma_{т,ж}$, $\sigma_{ж,г}$ – поверхностная энергия на границе раздела фаз твердое тело – газ, твердое тело – жидкость, жидкость – газ.

Поверхности, смачиваемые жидкостью и при угле смачивания менее 90° , принято называть гидрофильными. При $\theta_0 = 90-180^\circ$ и отсутствии смачивания жидкостью поверхности являются

гидрофобными. В некоторых случаях отдельно выделяют супергидрофильные ($\theta_0 \leq 10^\circ$) и супергидрофобные ($\theta_0 \leq 150^\circ$) поверхности.

Для практического применения наибольший интерес представляют гидрофобные поверхности. Известно, что они обладают устойчивостью к льдообразованию и обрастанию отложениями. При их использовании происходит ингибирование коррозионных процессов, гидравлическое сопротивление при транспортировке жидких сред снижается [2]. Для гидрофобных шероховатых поверхностей принято выделять состояния смачивания (модели) Венцеля и Касси – Бакстера, схематическое изображение которых показано на рис. 2.

В модели Венцеля капля взаимодействует со всей поверхностью, полностью заполняя впадины шероховатости, что увеличивает фактическую площадь контакта между поверхностью и каплей. Такое состояние принято называть гомогенным смачиванием, а угол смачивания определять по уравнению Венцеля [3]

$$\cos\theta = r\cos\theta_0, \quad (2)$$

где r – коэффициент шероховатости поверхности, равный отношению истинной площади поверхности к кажущейся.

Модель Касси – Бакстера описывает гетерогенный режим смачивания, при котором капля расположена на вершинах шероховатости и не заполняет впадины. Угол смачивания для данного состояния вычисляется по уравнению Касси – Бакстера [4]

$$\cos\theta = fr\cos\theta_0 + f - 1, \quad (3)$$

где f – доля проекции смоченной площади на поверхность подложки с учетом частичного заполнения пор.

Таким образом, основными условиями, совместное выполнение которых необходимо для создания гидрофобных поверхностей, являются изменение морфологии поверхности материала в целях обеспечения гетерогенного режима смачивания и снижение поверхностной энергии [5]. Существуют различные методы создания гидрофобных поверхностей, среди которых широкое применение получили химическое осаждение из паровой фазы, химическое травление, фотолитография, термическое тиснение, электроосаждение наночастиц и др. Перечисленные методы довольно сложно реализуемы и требуют использования дорогостоящего оборудования. В настоящее время интенсивно развивается метод модификации поверхностей различных конструкционных материалов с использованием лазерного оборудования – лазерная абляция. Лазерная абляция представляет

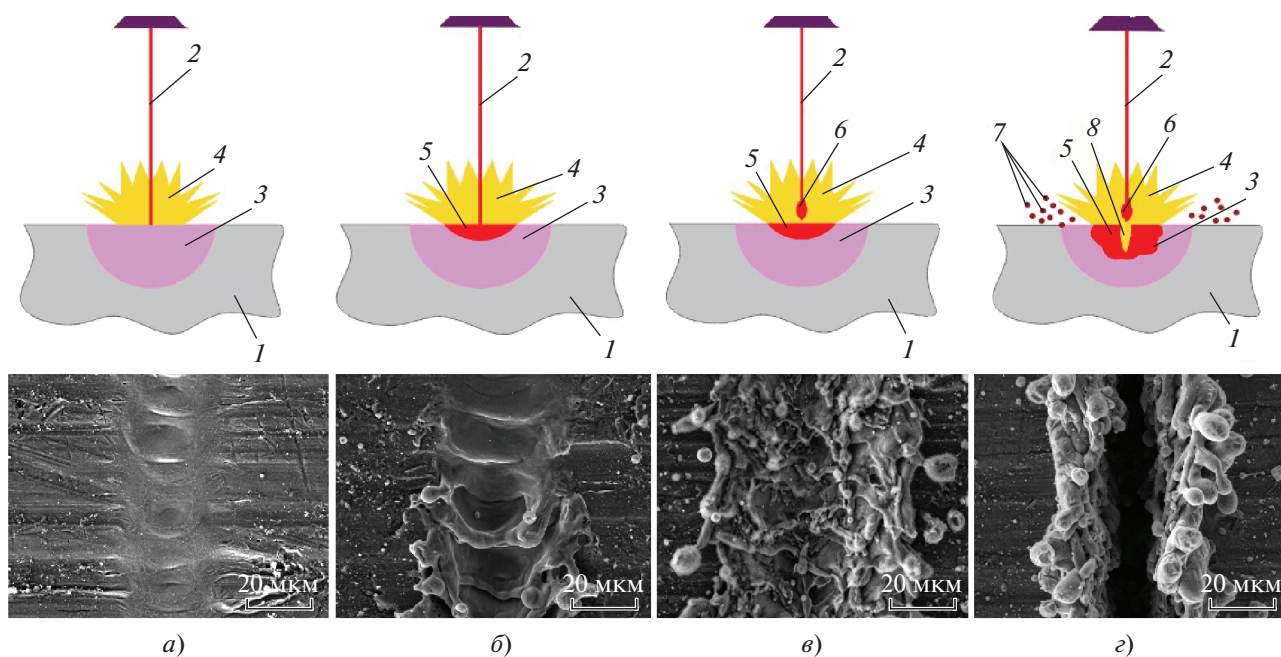


Рис. 3. Схематичное изображение процесса лазерной абляции металлической поверхности.

a – нагрев; *b* – плавление; *v* – испарение; *z* – рекристаллизация поверхностного материала; 1 – образец; 2 – лазерное излучение; 3 – зона активного теплоотвода внутри материала; 4 – зона отвода энергии во внешнюю среду; 5 – зона локального расплавления материала; 6 – облако плазмы; 7 – брызги расплавленного материала образца; 8 – зона локально испарившегося материала

собой оптико-термический метод воздействия лазерного излучения на поверхность, который может быть применен к любому материалу, поглощающему свет. При текстурировании поверхности металла с помощью лазерного источника происходят плавление, испарение, рекристаллизация поверхностного слоя материала (рис. 3). При варьировании параметров воздействия лазерного излучения можно создавать на поверхности металла структурированный рельеф с различными геометрическими характеристиками [6].

Гидрофобизация металлических поверхностей с использованием лазерного оборудования включает в себя последовательное выполнение следующих этапов:

подготовку исходной поверхности;

выбор типа лазерного источника;

определение параметров излучения и траектории движения лазерного луча для формирования на поверхности материала рельефа с требуемыми геометрическими характеристиками;

снижение поверхностной энергии после лазерной абляции.

В настоящей работе представлен обзор научных исследований, посвященных изменению смачиваемости металлических поверхностей с помощью лазерной абляции.

ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ

Конструкционный материал при изготовлении подвергают различным воздействиям, вследствие чего на его поверхности образуются царапины, заусенцы, загрязнения, окалина и другие дефекты. Для создания необходимой шероховатости перед лазерной абляцией используют различные методы, которые можно классифицировать по типам воздействия на обрабатываемую поверхность (рис. 4) [7].

Наиболее распространенным способом подготовки поверхности перед лазерной модификацией является шлифование [8–31]. Как правило, для обработки поверхности металла используют шлифовальные и полировочные материалы, такие как абразивная бумага [32–58] зернистостью 150–2500 мкм и алмазные пасты [59–65]. В работах [66, 67] поверхностный слой материала удаляли путем фрезерования.

Другим методом подготовки поверхности является электрохимический (рис. 5) [68–70]. С помощью электролитов на основе ортофосфорной кислоты осуществляют полировку образцов из меди, на основе фосфорной и серной кислот – полировку черных металлов. Электрохимическая полировка, по сравнению с механическими методами, является более быстрым способом, при этом снижается коррозионное воздействие на конструкционные материалы, кроме того, возможна полировка поверхно-



Рис. 4. Классификация методов шлифования поверхности металлов

сти с полостями и отверстиями. Следует отметить, что устранение дефектов в виде масштабных трещин и впадин с помощью электрохимической полировки недостижимо.

После предварительной подготовки исходной поверхности конструкционного материала проводится ее очистка от загрязнений. Анализ литературных источников показал, что преимущественно применяют ультразвуковую очистку в жидкой среде, внутри которой с помощью ультразвукового преобразователя распространяются высокочастотные звуковые волны, развивающие акустические

течения и кавитацию. В качестве жидкой среды используют дистиллированную [8, 16, 24, 33, 53, 71–73] и деионизованную [10, 17, 23, 35, 36, 45, 46, 58, 74–82] воду, этанол [8, 16, 18, 21, 23, 24, 33–36, 42, 44–46, 53, 57, 71–73, 75–77, 79, 81, 83, 84], ацетон [7, 10, 15–17, 20, 23, 24, 27, 32, 33, 35, 36, 40, 42, 44–46, 50, 53, 55, 71–74, 83, 85, 86]. В некоторых работах удаление загрязнений проводилось с использованием растворов гидроксида калия [78, 80, 82, 87, 88], соляной кислоты [16], спиртов [19, 37, 40, 52, 69, 70, 89–98] и других растворителей [99–101]. Для удаления остатков растворителей конструкционный материал промывают дистиллированной [16, 37, 42, 50, 56, 87, 88] и деионизованной [100] водой. Завершающим этапом процесса подготовки поверхности конструкционного материала к лазерной абляции является сушка поверхности воздухом [19, 21, 32, 36, 45, 53, 56, 76, 78–80, 82] или азотом [8, 16, 23, 35, 40, 42, 75].

В отдельных работах исследователи перед проведением лазерной абляции наносили различные покрытия. Так, в работе [37] на поверхности стальных и медных образцов было сформировано полиамидное покрытие толщиной 600–800 мкм. В [34] использовали мартенситную нержавеющую сталь с азотированной поверхностью, что обеспечило увеличение твердости поверхности до 1001 HV при

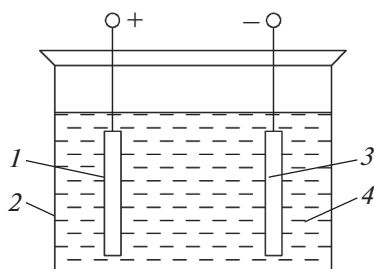


Рис. 5. Схема процесса электрохимической полировки. 1 – обрабатываемый материал; 2 – электролитическая ванна; 3 – металлический катод; 4 – электролит

начальном значении 172 HV. Также это способствовало повышению угла смачивания от 77° после шлифования до 100° после азотирования, что свидетельствует о получении гидрофобной поверхности на этапе предварительной обработки материала.

Как видно из вышесказанного, для одних и тех же материалов применяют разные способы предварительной подготовки исходной поверхности. Выбор того или иного способа обусловлен, как правило, состоянием поверхности исходного конструкционного материала и геометрическими характеристиками материала, формируемого с использованием лазерной абляции.

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

В качестве источников лазерного излучения применяют газовые и твердотельные лазеры с милли-, нано-, пико- и фемтосекундной длительностью импульса (рис. 6).

В твердотельных лазерных источниках активной средой является кристалл или оптическое волокно. В большей части рассмотренных исследований использовали твердотельные волоконные лазерные источники и источники когерентного оптического излучения. Основные составляющие волоконного лазера – лампа накачки и оптический кабель, состоящий из светопроводящего волокна и сердцевины из прозрачного кварца.

В указанных работах приводятся характеристики источников лазерного излучения, описание экспериментальных образцов и вид рельефа, формируемого на поверхности. Например, в [34] текстурирование поверхностей образцов из мартенситной стали X6Cr17 выполняли с использованием лазерного комплекса SPI G4 50 W HS-S. Главной составной частью данного комплекса, имеющего максимальную мощность излучения 50 Вт, является волоконный лазер с длиной волны 1064 нм. Исследования проводили при следующих параметрах лазерного излучения:

длительность импульса 220 нс, скорость сканирования 150 мм/с, частота лазерного излучения 70 кГц (вариант 1);

длительность импульса 15 нс, скорость обработки поверхности 132 мм/с, частота импульсов 100 кГц (вариант 2).

Для достижения гидрофобного состояния на поверхности экспериментальных образцов формировали рельеф в виде сетки с квадратными ячейками при шаге между линиями 100 мкм. Результаты исследований показали, что углы смачивания для рельефа, сформированного при параметрах лазерного излучения в соответствии с вариантом 1, на 2.5–4.4% выше, чем для рельефа, выполненного по варианту 2.

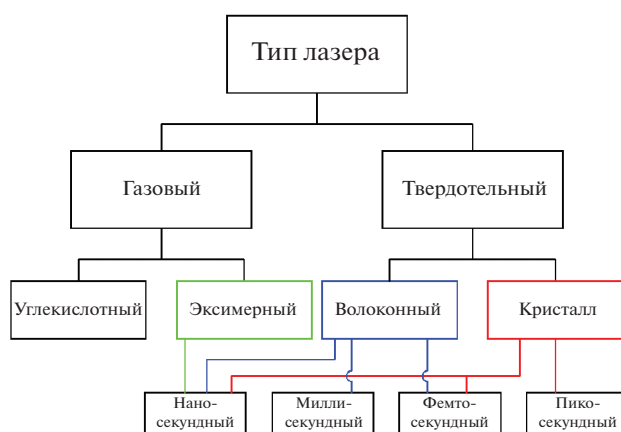


Рис. 6. Классификация лазерных установок

В работе [102] проводили модификацию поверхности экспериментального образца из меди размером 25 × 25 мм и толщиной 2.5 мм с использованием волоконного лазерного комплекса Epi-log Fiber. Движение лазерного луча по поверхности осуществлялось вдоль взаимно перпендикулярных линий, отстоящих одна от другой на 100 мкм, в целях получения структуры рельефа в виде выступов. Мощность лазерного излучения варьировали в пределах 65–80% максимальной (30 Вт), скорость сканирования лазерного луча составляла 0.60–1.55 мм/с, частота импульсов для всех образцов была равна 2.5 кГц. В результате проведенного исследования было выявлено, что при повышении мощности лазерного излучения и скорости сканирования угол смачивания увеличивается.

В работе [71] выполняли модификацию поверхности диоксида циркония, широко применяемого в медицине, с помощью лазерного источника на основе оптического волокна с длиной волны 1064 нм и наносекундной длительностью импульса при мощности излучения 12 Вт. При этом скорость сканирования была равна 100 мм/с, частота импульсов составляла 20 кГц.

Отдельно стоит отметить работу [103], в которой формирование рельефа на поверхности стали марки SUS 304 осуществляли с помощью миллисекундного волоконного лазера с длиной волны 1064 нм при мощности излучения на выходе фокусирующей системы 142 Вт. Вследствие достаточно значительной мощности излучения обеспечивалась высокая, достигающая 10000 мм/с, скорость лазерной обработки.

С использованием волоконных лазеров в различных исследованиях проводили модификацию поверхности экспериментальных образцов из алюминия [8, 65, 68, 104] и сплавов на его основе [13, 26, 35, 44, 45, 62, 64, 78–80, 82, 87–89, 91, 96, 98, 99, 105–112], титана [22–24, 53, 65, 75, 91, 97,

Таблица 1. Параметры излучения волоконных лазерных установок для формирования рельефа на поверхности конструкционных материалов

τ , с	λ , нм	Материал образца	P , Вт	v , мм/с	f , кГц	Литературный источник
10^{-6}	1064	Сталь:	142	10000	–	[103]
10^{-9}						
		SUS 304	70	5	70	[91]
		AISI 304	20	150	25	[93]
		AISI 316L	14	3.33	20	[66]
			20	0.50	200	[67]
			4–20	3.33	20	[116]
		X6Cr17	14	3.33	100	[117]
			12	700	100, 1000	[119]
			50	132	100	[34]
		17-4 PH	50	150	70	[18, 34]
			–	150	70	[120]
			12	600	20	[51]
		7C27Mo2	4	1.67	200	[115]
		12X18H10T	20	50	20	[118]
		Титан:				
		TA2	10	500	20	[75]
			70	5	70	[91]
		Ti–6Al–4V	12	300	20	[53]
			50	–	100–500	[97]
		Нитинол NiTi	8	500	20	[23]
			8	50	20	[24]
		Алюминий	10	100	20	[8]
			20	3200	500	[104]
			–	250	30	[68]
		Алюминиевый сплав:				
		2024	30	250	30	[13]
			2	100	100	[96]
		6061	10	500	20	[35]
			70	5	70	[91]
		7075	9	700	200	[105]
			12	700	300	[107]
		A0	–	–	20	[99]
		AlMg	20	50	20	[78–80, 88, 89, 106]
			20	–	20	[87]
			–	50	20	[82, 108]

Таблица 1. Окончание

τ , с	λ , нм	Материал образца	P , Вт	v , мм/с	f , кГц	Литературный источник
10^{-9}	1064	AlMg2	—	700	20	[109]
		AlMg6	20	1320	20	[26]
			—	1000–1320	20	[62, 64, 110, 111]
			—	—	20	[112]
		Алюминиевая бронза C95200	70	600	20	[21]
		Медь	30	250	20	[76]
	Медный сплав M1M	—	100	20	[81, 114]	
	Магниевый сплав: AZ31	10	500	20	[57]	
	AZ91	10	1500	20	[58]	
	Диоксид циркония	12	100	20	[71]	
—	Сталь 316L	50	500	20	[46]	
	Алюминиевый сплав AlMg6	—	1000–4000	20	[98]	
10^{-15}	1032	Сталь: X6Cr17	5	500	250	[121]
		AISI 316L	—	1000–2000	250–1000	[14]
		Медь, алюминий, титан	—	6	250	[65]
		Титан Ti–6Al–4V	5	—	—	[97]
	800	Титан Ti–6Al–4V	0.6	20	1	[22]
		—	40	1	[113]	

Примечание. τ – длительность импульса; λ – длина волны; P – мощность излучения; v – скорость сканирования; f – частота импульса.

113], меди [21, 65, 76, 81, 114], магния [57, 58] и нержавеющей стали различных марок [14, 18, 34, 46, 51, 66, 67, 91, 93, 115–121]. В основном модификацию поверхности образцов из перечисленных материалов выполняли с использованием нано- и фемтосекундного волоконных лазеров при мощности лазерного излучения 2–100 Вт, частоте импульсов 10–500 кГц, скорости сканирования 5–3200 мм/с. Длина волны при нано- и фемтосекундной длительности импульсов составляла 1064 и 1032 нм соответственно. Стоит отметить, что в рассмотренных исследованиях практически не указывается диаметр пятна контакта лазерного импульса с поверхностью, при том что данная характеристика обуславливает геометрическую форму рельефа. В табл. 1 приведены парамет-

ры лазерного излучения на основе оптического волокна, при которых были текстурированы поверхности различных металлических образцов.

Во многих исследованиях используют источники когерентного оптического излучения с активной средой в виде кристаллического материала. В качестве кристаллов для лазерных устройств применяют сапфир, легированный титаном, а также алюмоиттриевый гранат и иттриевый ванадат, легированные ионами неодима. От используемого материала зависят такие характеристики установки, как длина волны, мощность излучения, длительность импульса.

Лазеры на основе кристаллов применяют для модифицирования поверхности сталей [17, 36, 42, 50, 60, 69, 70, 86, 122–126], платины [127], латуни

Таблица 2. Параметры излучения кристаллических лазерных установок для формирования рельефа на поверхности металлических образцов

τ , с	λ , нм	Материал образца	P , Вт	v , мм/с	f , кГц	Литературный источник
10^{-9}	1064	Сталь:				
		AISI 304	2	10	20	[122]
			350	–	20	[123]
		AISI 316L	–	–	0.005	[50]
			350	–	–	[60]
		W18Cr4V	20	200	50	[36]
		AISI 4130	–	–	0.01	[125]
		Нержавеющая сталь	–	–	0.01	[124]
		Титан Ti–6Al–4V	0.08–0.30	80	20	[95]
		Алюминиевый сплав:				
	6061	16	2000	20	[101]	
	AW-5754	150	–	0.1	[131]	
	Медь	350	0.1	20	[137]	
	Сплав CuMn	–	200	3	[138]	
	800	Сталь AISI 316L	–	1	1	[17]
	355	Сталь AISI 304	1	40	100	[86]
		Титан Ti–6Al–4V	0.10–0.28	80	20	[90]
			1	40	100	[130]
			–	–	1.2	[40]
Титан		2–3	1	20	[128]	
		3	1	20	[129]	
Алюминий		3	1	20	[129]	
		3	1	20	[133]	
		0.3	40	100	[134]	
		0.3	–	100	[135]	
Оксид алюминия Al ₂ O ₃	0.25	1	20	[132]		
Медь	3	1	20	[129]		
Латунь	23	200	30	[52]		
10^{-12}	1064	Сталь:				
		X6Cr17	0.29	1.6	1	[69]
			–	3.4	1	[70]
			–	–	1	[126]
		AISI 304	–	0.174	1	[42]
		Титан:				
		Ti–6Al–4V	0.162	–	1	[90, 95]
			–	–	10	[97]
		титан 4-го класса	–	–	1	[77]
		Алюминиевый сплав:				
AW-1050	10	–	1	[68]		
2024	10	–	1	[13]		

Таблица 2. Окончание

τ , с	λ , нм	Материал образца	P , Вт	v , мм/с	f , кГц	Литературный источник		
10^{-12}	1030	Сталь AISI 316L	—	100	100	[11]		
		Алюминиевый сплав 7075	4	300	92.2	[136]		
	532	Нержавеющая сталь AISI 304	—	40	50	[39]		
		Сталь	—	0.5	1	[27]		
		Никелевый сплав С-263	3	3	45	[33]		
343	Оксид алюминия Al_2O_3	1	—	200	[85]			
10^{-15}	1032	Титан Ti–6Al–4V	30	750	100	[25]		
		$ZrO_2 + Al_2O_3$	—	1	2	[139]		
	800	Сталь:	AISI 304	—	3	1	[83]	
			AISI 304L	2	0.93	1	[47]	
			—	—	0.25	1	[9]	
			—	—	0.25	1	[54]	
			—	—	1.8	1	[29]	
			316L	1.7	0.25	1	[38]	
			—	—	2	0.25	1	[48]
			—	—	2	0.37	1	[100]
			AISI 630	—	0.25	1	[9]	
			нержавеющая	—	100	1	[143]	
		AISI M2	—	0.25	1	[9]		
		—	—	0.25	1	[54]		
		AISI P20	—	0.25	1	[54]		
		AISI P20 + Cr	—	0.25	1	[9]		
		AISI 4140	—	0.25	1	[9]		
		Титан:	Ti–6Al–4V	—	0.25	1	[9]	
			титан	0.06	1.5	1–10	[41]	
			—	0.04	0.25	1	[15]	
			—	—	—	1	[127]	
		Медь	—	0.04	0.25	1	[15]	
	—		0.8	1	1	[56]		
	—		0.8	2	10	[55]		
	—		0.8	4	10	[140, 141]		
	Латунь	—	—	—	1	[127]		
	Алюминий	—	0.04	0.25	1	[15]		
	Платина	—	—	—	1	[127]		
	$ZrO_2 + Al_2O_3$	—	—	2	1	[142]		
	Кобальт	—	0.04	0.25	1	[15]		
	Железо	—	0.04	0.25	1	[15]		

Таблица 3. Параметры излучения газовых лазерных установок, используемых для гидрофобизации металлических поверхностей

Лазер	λ , нм	P , Вт	v , мм/с	f , кГц	Литературный источник
Углекислотный	10000	20	—	5.0	[37]
	—	95	100	1.5	[146]
		1500–2000	10	1.0	[147]
			100	1.5	[145]
	1000	1.5	[144]		
Экцимерный	248	—	100	0.15	[59]
		—	—	0.001–2.00	[61]

[52], сплавов титана [40, 77, 90, 95, 97, 128–130], алюминия [13, 68, 101, 129, 131–136], меди [129, 137, 138] и других конструкционных материалов [15, 139].

Как правило, для создания необходимой шероховатости применяют кристаллические лазерные установки с нано-, пико- и фемтосекундной длительностью импульса, длиной волны 343–1064 нм, мощностью излучения 0.29–350 Вт, частотой импульсов от 5 Гц до 100 кГц и скоростью движения лазерного луча 0.25–200 мм/с. В табл. 2 представлены характеристики кристаллических лазерных источников, использованных в различных работах для формирования на поверхности конструкционных материалов рельефа необходимых геометрических параметров.

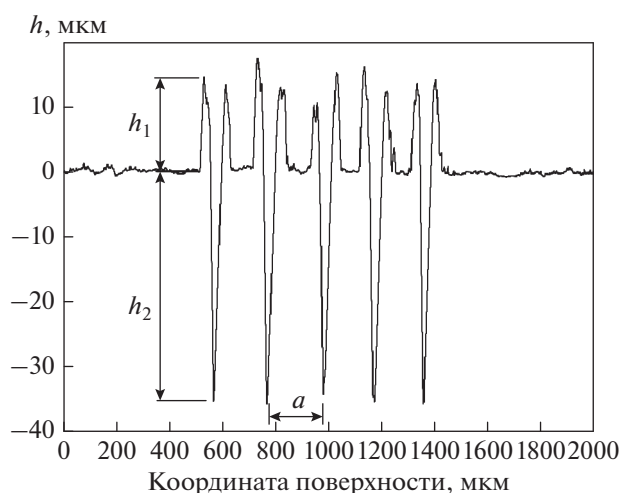


Рис. 7. Схематическое изображение основных геометрических характеристик рельефа.
 h_1 — высота выступа; h_2 — глубина впадины; a — расстояние между впадинами

В некоторых работах применяли газовый (CO_2) лазерный источник для модификации поверхности экспериментальных образцов, изготовленных из оксида алюминия [144], диоксида циркония [145], неодимового магнита [146], алюминия с добавлением карбида бора [147], стали DP690 и меди [37]. Основной принцип работы такого лазера заключается в его возбуждении с помощью электрической накачки молекул азота и передачи энергии молекулам углекислого газа, излучающим фотоны. Длина волны лазерного излучения варьируется в диапазоне от 9.6 до 10.4 мкм.

Авторы экспериментальных исследований [59, 61] текстурировали поверхности из нержавеющей стали 316 с применением газового эксимерного лазерного источника, в котором в качестве рабочего тела используется фторид криптона K_rF в газообразном состоянии. Для данного источника длина волны лазерного излучения составляет 248 нм. Другие параметры излучения газовых лазерных установок, которые использовались в указанных работах, представлены в табл. 3.

В работе [144] было отмечено, что применение азота под высоким давлением во время абляции поверхности оксида алюминия с помощью газового лазерного источника приводит к образованию на ней нитридных частиц. Плотный слой, состоящий из мелких частиц и нитридных фаз, способствует повышению твердости и остаточного напряжения модифицированной поверхности.

ТЕКСТУРИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА

Формирование на поверхности материала микро- и наномасштабного рельефов с определенными геометрическими параметрами для обеспечения устойчивого гетерогенного режима смачивания является одним из основных условий для создания гидрофобных поверхностей. Модификация поверхности металла с использо-

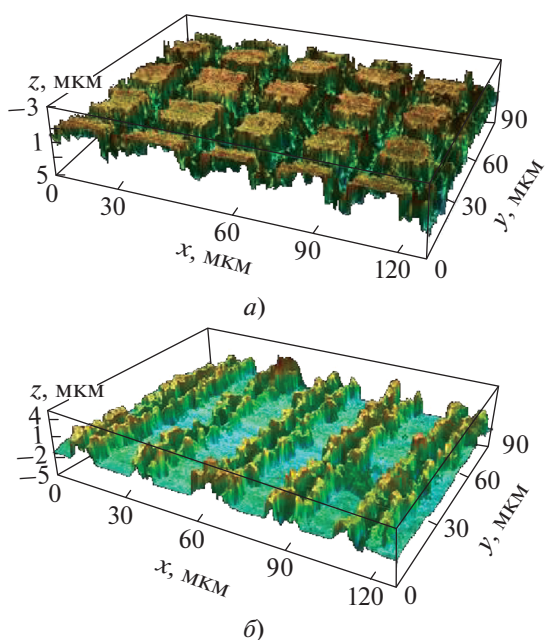


Рис. 8. Изображения текстуры поверхности образцов в виде сетки (а) и равноудаленных линий (б), полученные с использованием конфокального лазерного сканирующего микроскопа [148]

ванием лазерного оборудования позволяет получать разномасштабные упорядоченные текстуры с точной повторяемостью геометрических характеристик рельефа — высоты боковых выступов, глубины впадины и шага между линиями (впадинами) (рис. 7). Впадина на металлической поверхности образуется в результате плавления и испарения материала в месте контакта лазерного луча с поверхностью образца. Расплавленный материал движется из центра места контакта к его краям, остывает и кристаллизуется,

что приводит к формированию боковых выступов около впадины. Выполненные исследования показывают, что на поверхности металла формируются следующие рельефы:

- равноудаленные линии, сетки, микропоры;
- сетка с треугольными или шестиугольными ячейками;
- без выраженной структуры (нерегулярная структура).

Среди рельефов с выраженной структурой наиболее распространен рельеф в виде сетки или линий. Например, в работе [148] исследовали рельеф плоских алюминиевых пластин толщиной менее 100 мкм, текстурированных с использованием лазерного оборудования при нормальных атмосферных условиях. Движение лазерного луча по поверхности образцов в первой серии экспериментов было организовано вдоль взаимно перпендикулярных линий в целях получения структуры рельефа в виде сетки, во второй серии формировали рельеф в виде линий (рис. 8). Шаг между линиями варьировался в диапазоне 10–25 мкм. Максимальный угол смачивания после модификации с применением лазерного оборудования в первой серии опытов составил 179° , во второй серии — 160° . В результате проведенных исследований было установлено, что угол смачивания зависит от типа рельефа, сформированного на алюминиевой поверхности.

В работе [59] на поверхности экспериментальных образцов из нержавеющей стали был текстурирован рельеф в виде взаимно перпендикулярных каналов (сетки), расстояние между которыми варьировалось в диапазоне от 10 до 250 мкм, а глубина каналов — от 1 до 8 мкм. Угол смачивания для исходной поверхности экспериментальных образцов составлял 68.5° , а для текстурированной поверхности изменялся в диапазоне от 51.4 до 130.0° . Было выявлено, что максимальный угол смачива-

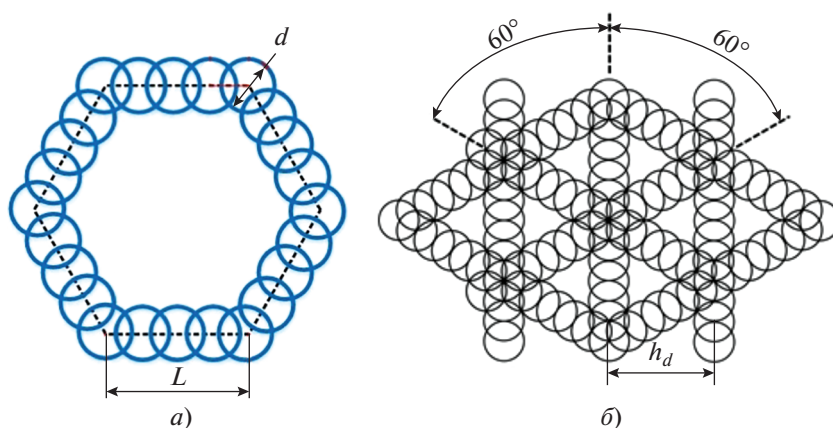


Рис. 9. Траектории движения лазерного луча по поверхности образцов из титана (а) [75] и алюминия (б) [68]

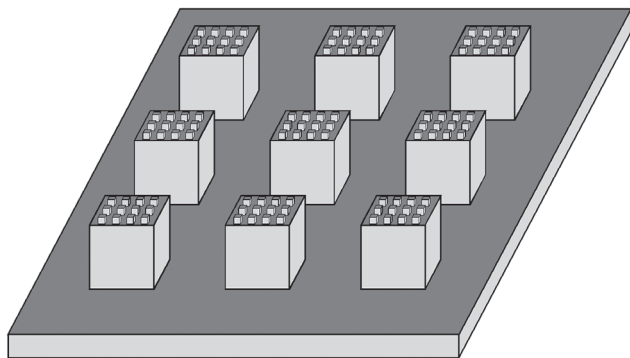


Рис. 10. Схематическое изображение многомодального рельефа

ния обеспечивается при глубине впадин около 8 мкм.

Одной из разновидностей рельефа поверхности являются впадины [11, 12, 20, 21, 32, 42, 149]. Авторы работ [11, 12] изготовили образцы из нержавеющей и инструментальной сталей. Рельеф на поверхности экспериментальных образцов из нержавеющей стали был сформирован в виде впадин прямоугольной формы глубиной 0.5 мкм, расположенных на расстоянии 850 нм одна от другой. На поверхности инструментальной стали был создан рельеф в виде округлых впадин радиусом 11.8 ± 0.7 мкм, глубиной 6.9 ± 0.7 мкм. Максимальный угол смачивания после лазерной абляции на образцах из нержавеющей стали составлял $148 \pm 5^\circ$, на образцах из инструментальной стали – 110° . На экспериментальных образцах из алюминиевой бронзы [21] и алюминия [149] были достигнуты гидрофобные состояния при угле смачивания 162.63 и $148 \pm 3^\circ$ соответственно.

В работах [68, 75] формировался рельеф в виде сетки на поверхности экспериментальных образцов из титана и алюминия. На поверхности титановых образцов траектория движения лазерного луча была организована таким образом, чтобы в результате был создан рельеф в виде сетки из шестиугольников (рис. 9, а), длина стороны которых L составляла 50, 100 и 150 мкм в каждой серии исследований. Ширина канала соответствовала диаметру пятна контакта луча лазерного излучения $d = 60$ мкм. Результаты исследований [75] показали, что на образцах из титана максимальный угол смачивания поверхности при $L = 150$ мкм равен 147.4° . На поверхности экспериментальных образцов из алюминия был сформирован рельеф в виде сетки из равносторонних треугольников (рис. 9, б). Шаг между параллельными линиями h_d варьировался от 50 до 500 мкм, угол смачивания на исходной поверхности составлял от 75 до 90° , после модификации – 155° .

В [8, 9, 13, 14, 26, 33, 49, 50, 62, 64, 74, 76, 81, 82, 88, 98, 103, 108, 109, 111–114, 125, 144, 147, 150] приведены данные исследований рельефа с нерегулярной структурой, которая, как правило, создается следующими способами:

хаотичным движением лазерного луча по поверхности [13];

увеличением количества проходов лазерного луча [14, 33, 76, 108] по модифицируемой поверхности;

значительным перекрытием пятен контакта лазерных импульсов [9, 49, 98, 112, 114, 125, 144, 147];

дополнительной обработкой после лазерной абляции [8, 49, 81, 82, 88, 98, 103, 109, 112, 125].

Авторы работы [144] модифицировали поверхность оксида алюминия с использованием лазерного комплекса с перекрытием пятен контакта лазерного излучения на 72%, в результате чего был сформирован рельеф нерегулярной структуры с микро/наноразмерными впадинами, глубина которых достигала 15 мкм. До модификации угол смачивания составлял 63.2° , после лазерной абляции он увеличился до 120.8° . В работах [9, 74] рельеф в виде нерегулярной структуры формировали на образцах из титанового сплава Ti–6Al–4V и нержавеющей стали марки AISI 304L. После воздействия лазерного излучения поверхность этих материалов становилась несмачиваемой при $\theta_0 = 153.0 \pm 0.3^\circ$ на образце из титанового сплава и $\theta_0 = 147^\circ$ на образце из нержавеющей стали.

В некоторых работах представлены результаты исследований многомодального рельефа, формирование которого производили последовательным воздействием лазерного излучения различной интенсивности на поверхность экспериментальных образцов. Примером многомодального рельефа является сетка с квадратными или прямоугольными выступами, на верхней поверхности которых создается рельеф в виде сетки с меньшими значениями геометрических параметров (рис. 10) [83, 90, 94, 95]. В работе [83] также был создан линейный нанорельеф на верхней поверхности ранее сформированного микрорельефа в виде равноудаленных одна от другой линий, что является уникальным исследованием среди всех ранее рассмотренных.

В работах [90, 95] формирование иерархических периодических структур на подложке образцов толщиной 2 мм, изготовленных из титанового сплава Ti–6Al–4V, было проведено в два этапа с использованием лазерного источника при наносекундной длительности импульсов. В результате первого процесса лазерного текстурирования с наносекундной длительностью импульса был получен рельеф в виде сетки с квадратными микроячейками, расстояние между впадинами которых составляло 50 мкм, высота выступа и глубина впа-

Таблица 4. Геометрические параметры рельефа, сформированного на поверхности конструкционного материала

Рельеф	h_d , мкм	h_1 , мкм	h_2 , мкм	θ_0 , град	Дополнительные параметры	Источник	
Линейный	2	–	–	145.7 ± 0.8	–	[121]	
	3	1.3	–	123–132	–	[77]	
	25	–	2.00–2.75	155	Ширина канала 8 мкм	[151]	
	27–33	1.75–2.75	–	160	Ширина канала 7–8 мкм, ширина выступа 20–25 мкм	[134, 148]	
	88	5.6	–	140	Ширина канала 78 мкм	[25]	
	100	1.46–5.75 11.0 Не более 12.0 –	4.07–7.23 – Не более 5.0 10 50 75 –	151–175	–	[34]	
				172	–	[18]	
				170	–	[120]	
				150–158	–	[127]	
				150–158	–	[127]	
				158	–	[127]	
				152	Шероховатость 18.0 ± 1.2 мкм	[16]	
	150	–	–	117	Шероховатость 0.433 мкм	[72]	
	Сетка	0.85	–	0.5	148 ± 5 154 ± 3	–	[11]
		2	–	–	157.1 ± 1.6	Сетка из треугольников	[121]
5.2		–	5.0	120	–	[126]	
			11.5	145	–	[69]	
7		2.2* –	–	144–153	–	[68]	
			5.8	159 ± 2	–	[13]	
11		15.0	–	145–153	Диаметр основания выступа 10 мкм	[29]	
15		–	–	168	–	[135]	
				179	–	[151]	
20		31.1** –	–	153 ± 3	–	[85]	
				179	–	[151]	
25		–	30.0	129	–	[91]	
			–	148 ± 3	Круглые отверстия	[149]	
27–33		1.75–2.75	–	168	Ширина канала 7–8 мкм, ширина выступа 20–25 мкм	[134]	
40		20.0	–	161	Размер структур 200–600 нм	[52]	
50	10.6* –	– 7*** 30.0 36.8	155	Сетка из треугольников	[68]		
			154	Шероховатость не более 11 мкм	[93]		
			130	–	[91]		
			150	–	[91]		
156 \pm 4	Сетка из треугольников	[13]					
75	–	8.0	130	Ширина канала 50 мкм	[59]		
100	1.39–6.11 –	4.40–9.25 –	150–167	–	[34]		
			156	Шероховатость 26.0 ± 1.2 мкм	[16]		
130	–	10.0	135 ± 4	Ширина канала 30 мкм	[102]		
150	–	–	117	Шероховатость 0.476 мкм	[72]		

Таблица 4. Окончание

Рельеф	h_d , мкм	h_1 , мкм	h_2 , мкм	θ_0 , град	Дополнительные параметры	Источник
Сетка	—	22.9*	—	131 ± 4.6	—	[110]
		—	—	147.4	Сетка из шестиугольников, длина стороны 150 мкм, ширина канала 60 мкм	[75]
Нерегулярная структура	—	—	0.06	103–127	Средний размер частиц 1.2 мкм	[145]
			4.2	Более 150	—	[13]
			—	119 ± 5	Средняя шероховатость 90 нм	[14]
			—	131.0 ± 4.6	Число линий – 20/мм	[64]
			—	115.5	Средняя шероховатость 847 ± 17 мкм	[50]
			—	132–147	Диаметр частиц 2.5–3.5 мкм, длина частиц 1.5–5.5 мкм	[9]
			—	140 ± 2	Нановыступы, средняя шероховатость 60 нм	[14]
			—	150	Размер микроструктур 20–60 мкм, наночастиц 470 нм	[113]
			—	153 ± 0.3	Диаметр частиц 4.4 мкм	[74]
			—	160 ± 6	В виде “шипов”, средняя шероховатость 8.6 мкм	[14]
			—	107	—	[152]
—	144.3	—	[56]			
Волнистая структура	175–275	—	350.0	141.0 ± 0.5	—	[33]
Много-модальный	30.0***	10.4	—	153	Линии поверх линий, ширина канала 20 мкм (крупная)	[83]
	0.25****	0.15	0.35	—	—	—
	15.0***	2.3	—	156.4 ± 3.0	Сетка поверх сетки	[94]
	2.6****	—	—	—	—	—
	50.0***	10.4	—	158	Сетка поверх сетки, ширина канала 20 мкм (крупная)	[83]
	1.5****	0–1	0.1	—	—	—
—	50.0***	4–10	4–10	110.8–113.8	Сетка поверх сетки	[90, 95]
—	50.0***	33.8	—	161 ± 2	Сетка поверх сетки	[28]

Примечание. Шероховатость – отклонение выступа или впадины от исходной поверхности образца.









* Среднеквадратичная сетка.

** Максимум.

*** Для крупной сетки.

**** Для мелкой сетки.

Таблица 5. Эволюция формы капли воды на поверхности образцов из меди, модифицированной с использованием лазерного оборудования [102]

Продолжительность выдержки, сут	Исходная поверхность	Модифицированная поверхность
1		
7		
13		
20		

дины изменялись в диапазоне от 4 до 10 мкм. Второй этап модификации поверхности материала выполняли с помощью лазерного источника при пикосекундной длительности импульсов. При этом был образован рельеф в виде равноудаленных столбов квадратного профиля на верхней поверхности структур, полученных после первого этапа обработки, с меньшими значениями геометрических параметров. Расстояние между формируемыми бороздками составило 2.6 мкм, высота выступа и глубина впадины – соответственно 3.3 и 3.8 мкм. На образце из титанового сплава была создана гидрофобная поверхность с $\theta_0 = 113.8^\circ$. Угол смачивания исходной поверхности образцов из алюминия составлял 89.15° , после модификации при аналогичном рельефе он увеличился до $156.4 \pm 3.0^\circ$.

В табл. 4 представлены данные о рельефах, сформированных на металлической поверхности с помощью лазерного комплекса, их геометрических характеристиках и углах смачивания. Экспериментальные образцы после лазерной абляции хранились на воздухе.

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Один из наиболее распространенных способов снижения поверхностной энергии модифицированных с использованием лазерной абляции металлических образцов – выдерживание их на воздухе в течение определенного времени. Так, в работе [102] экспериментальные образцы из меди после лазерной модификации их поверхности выдерживали на воздухе при нор-

мальных условиях (табл. 5). Каплю размещали на поверхности образца непосредственно перед измерением угла смачивания. При этом снижалась поверхностная энергия и увеличивался угол смачивания, который после выдержки в течение 20 сут составил 135° .

В некоторых исследованиях перед выдерживанием на воздухе модифицированную поверхность экспериментальных образцов очищали с помощью кислот и солей, обдували сжатым воздухом или азотом. Иногда выполняли ультразвуковую очистку образцов, помещенных в этанол, ацетон, дистиллированную или деионизованную воду.

В работе [153] было отмечено, что продолжительность хранения металлических образцов на воздухе в целях сорбирования органических веществ на поверхности с текстурированным рельефом зависит от материала образца, параметров лазерного излучения, содержания и состава различных веществ в окружающем воздухе. В большинстве исследований, результаты которых приведены в табл. 4, время выдержки экспериментальных образцов на воздухе при нормальных условиях после лазерной абляции варьировали в диапазоне от 10 до 30 сут.

Некоторые исследователи предлагают альтернативные способы снижения поверхностной энергии металла после лазерной абляции, одним из которых является низкотемпературный отжиг. В работе [137] исследовали воздействие низкотемпературного отжига с этанолом на смачиваемость медной поверхности, модифицированной с применением лазерного оборудования. Было установлено, что поверхность эксперименталь-

ных образцов, выдержанных без этанола в течение 13 ч в печи при 100°C, стала гидрофобной, при этом угол смачивания составил 160°. При добавлении этанола через каждые 30 мин в процессе отжига гидрофобизация поверхности экспериментальных образцов проявлялась менее чем через 5 ч, а угол смачивания достигал 165°. Низкотемпературный отжиг также использовали в некоторых исследованиях при обработке после лазерной абляции поверхности образцов из нержавеющей стали [123], титана [75, 128], латуни [19], сапфира [132] и алюминия [133].

Другим способом снижения поверхностной энергии экспериментальных образцов после лазерного текстурирования рельефа является их выдержка в вакуумной камере [40, 86, 105, 107, 119, 130, 136, 154]. В исследовании [136] образцы из алюминиевого сплава Al7075 по окончании лазерной абляции выдерживали в вакуумной камере в течение 4 ч, после чего угол смачивания модифицированной поверхности составил около 179°. Авторы работы объясняют данный эффект сорбированием на поверхности образцов органических соединений минерального масла, которое используется в роторном насосе вакуумной камеры. Это объяснение было подтверждено в исследовании [86], в котором модифицированную с применением лазерного комплекса поверхность подвергали плазменной очистке в целях удаления загрязнений перед помещением образца в вакуумную камеру.

ВЫВОДЫ

1. Для лазерной модификации поверхности конструкционных материалов используют твердотельные лазерные источники наносекундной длительностью импульса, при выборе которых следует руководствоваться стоимостью, доступностью и простотой технического обслуживания оборудования.

2. Модификация поверхности с использованием лазерного оборудования позволяет создавать разномасштабные упорядоченные текстуры, обеспечивает точную повторяемость геометрических характеристик рельефа и образование гидрофобных поверхностей с устойчивым гетерогенным режимом смачивания.

3. Для повышения гидрофобизации металлических поверхностей с помощью лазерного текстурирования на них формируется рельеф в виде равноудаленных линий, микропор, сетки с прямоугольными, треугольными или шестиугольными ячейками, а также рельеф без выраженной структуры (нерегулярная структура).

4. Гидрофобное состояние металлической поверхности с наиболее большими углами смачивания (более 150°) достигается при лазерном тексту-

рировании рельефа в виде равноудаленных линий или сетки с шагом не более 100 мкм.

5. Максимальный угол смачивания (около 179°) получен при формировании рельефа в виде сетки с равноудаленными на 15 и 20 мкм взаимно перпендикулярными линиями.

6. Для достижения максимальных углов смачивания после лазерной абляции металлической поверхности необходимо снизить поверхностную энергию. Применяемые для этого в настоящее время способы основаны на сорбции поверхностью органических соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Young T.** An essay on the cohesion of fluids // *Philos. Trans.* 1805. V. 95. P. 65–87.
<https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005>
2. **Influence** of textural statistics on drag reduction by scalable, randomly rough superhydrophobic surfaces in turbulent flow / A. Rajappan, K. Golovin, B. Tobelmann, V. Pillutla, A. Abhijeet, W. Choi, A. Tuteja, G. McKinley // *Phys. Fluids*. 2019. V. 31. Is. 4. P. 042107.
<https://doi.org/10.1063/1.5090514>
3. **Wenzel R.N.** Resistance of solid surfaces to wetting by water // *Ind. Eng. Chem.* 1936. V. 28. Is. 8. P. 988–994.
<https://doi.org/10.1021/IE50320A024>
4. **Cassie A.B.D., Baxter S.** Wettability of porous surfaces // *Trans. Faraday Soc.* 1944. V. 40. P. 546–551.
<https://doi.org/10.1039/tf9444000546>
5. **Hydrophobic** brass surfaces created by means of multi-scale relief / A.V. Ryzhenkov, M.R. Dasaev, S.V. Grigoriev, A.V. Kurshakov, O.V. Ryzhenkov, M.V. Lukin // *Int. J. Mech. Eng. Technol.* 2018. V. 9. Is. 12. P. 58–70.
6. **Influence** of processing parameters on surface texture homogeneity using direct laser interference patterning / A.I. Aguilar-Morales, S. Alamri, T. Kunze, A.F. Lasagni // *Opt. Laser Technol.* 2018. V. 107. P. 216–227.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.05.044>
7. **Belkin P.N., Kusmanov S.A., Parfenov E.V.** Mechanism and technological opportunity of plasma electrolytic polishing of metals and alloys surfaces // *Appl. Surf. Sci. Adv.* 2020. V. 1. P. 100016.
<https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2020.100016>
8. **Yang Z., Liu X., Tian Y.** Novel metal-organic superhydrophobic surface fabricated by nanosecond laser irradiation in solution // *Colloids Surf., A*. 2020. V. 587. P. 124343.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124343>
9. **Kietzig A.M., Hatzikiriakos S., Englezos P.** Patterned superhydrophobic metallic surfaces // *Langmuir*. 2009. V. 25. Is. 8. P. 4821–4827.
<https://doi.org/10.1021/la8037582>
10. **Study** on hierarchical structured PDMS for surface super-hydrophobicity using imprinting with ultra-fast laser structured models / B. Liu, W. Wang, G. Ji-

- ang, X. Mei, Z. Wang, K. Wang, J. Cui // *Appl. Surf. Sci.* 2016. V. 364. P. 528–538.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.190>
11. **Direct** laser interference patterning of stainless steel by ultrashort pulses for antibacterial surfaces / A. Peter, A.H.A. Lutey, S. Faas, L. Romoli, V. Onuseit, T. Graf // *Opt. Laser Technol.* 2020. V. 123. P. 105954.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105954>
 12. **Tribological** response of laser-textured steel pins with low-dimensional micrometric patterns / G. Fiaschi, M. Lauro, A. Ballestrazzi, A. Rota, F. Biscarini, S. Valeri // *Tribology Int.* 2020. V. 149. Is. 5. P. 105548.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.007>
 13. **Fabrication** of superhydrophobic and ice-repellent surfaces on pure aluminium using single and multiscaled periodic textures / S. Milles, M. Soldera, B. Voisiat, A.F. Lasagni // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. Is. 1. P. 13944.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-49615-x>
 14. **Lutey A.H.A., Gemini L., Romoli L.E.A.** Towards laser-textured antibacterial surfaces // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. Is. 1. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-28454-2>
 15. **Laser-patterned** super-hydrophobic pure metallic substrates: cassie to Wenzel wetting transitions / A.M. Kietzig, M.N. Mirvakili, S. Kamal, P. Englezos, S.G. Hatzikiriakos // *J. Adhesion Sci. Technol.* 2015. V. 25. Is. 20. P. 2789–2809.
<https://doi.org/10.1163/016942410X549988>
 16. **Study** on the fabrication of super-hydrophobic surface on inconel alloy via nanosecond laser ablation / Z. Yang, Y. Tian, Y. Zhao, C. Yang // *Mater.* 2019. V. 12. Is. 2. P. 278.
<https://doi.org/10.3390/ma12020278>
 17. **Superhydrophobic** surfaces fabricated by microstructuring of stainless steel using a femtosecond laser / B. Wu, M. Zhou, J. Li, X. Ye, G. Li, L. Cai // *Appl. Surf. Sci.* 2009. V. 256. Is. 1. P. 61–66.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.07.061>
 18. **Durability** and wear resistance of laser-textured hardened stainless steel surfaces with hydrophobic properties / A. Garcia-Giron, J.M. Romano, A. Batal, B. Dashtbozorg, H. Dong, E.M. Solanas, D.U. Angos, M. Walker, P. Penchev, S.S. Dimov // *Langmuir.* 2019. V. 35. Is. 15. P. 5353–5363.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00398>
 19. **Reversible** wettability transition between superhydrophilicity and superhydrophobicity through alternate heating-reheating cycle on laser-ablated brass surface / X. Li, Y. Jiang, Z. Jiang, Y. Li, C. Wen, J. Lian // *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 492. P. 349–361.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.06.145>
 20. **Influence** of surface wettability on the tribological properties of laser textured Co–Cr–Mo alloy in aqueous bovine serum albumin solution / L. Qin, P. Lin, Y. Zhang, G. Dong, Q. Zeng // *Appl. Surf. Sci.* 2013. V. 268. P. 79–86.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.12.003>
 21. **Li X., Liu Q., Dong G.** Self-assembly membrane on textured surface for enhancing lubricity of graphene oxide nano-additive // *Appl. Surf. Sci.* 2020. V. 505. P. 144572.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144572>
 22. **Jiao L., Moon S.K.** Laser induced hydrophobicity on the Ti6Al4V additive manufacturing parts // *Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Progress in Additive Manufacturing.* Singapore, 14–17 May 2018. P. 493–497.
<https://doi.org/10.25341/D47C7D>
 23. **Fabrication** and stability investigation of bio-inspired superhydrophobic surface on nitinol alloy / C.J. Yang, Y.C. Zhao, Y.L. Tian, F.J. Wang, X.P. Liu, X.B. Jing // *Colloids Surf., A.* 2019. V. 567. P. 16–26.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.01.032>
 24. **Fabrication** of bio-inspired Nitinol alloy surface with Tunable anisotropic wetting and high adhesive ability / Y.L. Tian, Y.C. Zhao, C.J. Yang, F.J. Wang, X.P. Liu, X.B. Jing // *J. Colloid Interface Sci.* 2018. V. 527. P. 328–338.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.05.013>
 25. **The effects** of femtosecond laser-textured Ti–6Al–4V on wettability and cell response / O. Raimbault, S. Benayoun, K. Anselme, C. Mauclair, T. Bourgade, A.M. Kietzig, P.L. Girard-Lauriault, S. Valette, C. Donnet // *Mater. Sci. Eng.: C.* 2016. V. 69. P. 311–320.
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.06.072>
 26. **Prediction** of water droplet behavior on aluminum alloy surfaces modified by nanosecond laser pulses / D.V. Zaitsev, K.A. Batishcheva, G.V. Kuznetsov, E.G. Orlova // *Surf. Coat. Technol.* 2020. V. 399. P. 126206.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126206>
 27. **Preparation** of super-hydrophobic surface on metal by picosecond laser pulses / B. Liu, K. Wang, W. Wang, X. Mei, Z. Wang // *Proc. of the Conf. on Laser and Tera-Hertz Science and Technology.* Wuhan, China, 01–02 Nov. 2012. P. MF3B.1.
<https://doi.org/10.1364/LTST.2012.MF3B.1>
 28. **Characterization** of self-cleaning properties on superhydrophobic aluminum surfaces fabricated by direct laser writing and direct laser interference patterning / S. Milles, M. Soldera, T. Kuntze, A.F. Lasagni // *Appl. Surf. Sci.* 2020. V. 525. P. 146518.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146518>
 29. **Moradi S., Englezos P., Hatzikiriakos S.G.** Contact angle hysteresis: surface morphology effects // *Colloid Polym. Sci.* 2013. V. 291. Is. 2. P. 317–328.
<https://doi.org/10.1007/s00396-012-2746-3>
 30. **Extreme-wettability** textured materials for water collection from aerosols / K.A. Emelyanenko, S.N. Melnikov, P.I. Proshin, A.G. Domantovsky, A.M. Emelyanenko, L.B. Boinovich // *Dokl. Phys. Chem.* 2019. V. 489. Is. 2. P. 478–482.
<https://doi.org/10.1134/S0012501619120017>
 31. **Zrunek M.** Corrosion protection of metal structures. Praha: Mechanical Engineering, 1984.

32. **Super-hydrophobicity** and corrosion resistance of laser surface textured AISI 304 stainless steel decorated with hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) / L. Zhang, N. Lin, J. Zou, X. Lin, Z. Liu, S. Yuan, Y. Yu, Z. Wang, Q. Zeng, W. Chen // *Opt. Laser Technol.* 2020. V. 127. Is. 8. P. 106146.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106146>
33. **Droplet** spreading and wettability of laser textured C-263 based nickel superalloy / F.P. Prakash, N. Jeyaprakash, M. Duraiselvam, G. Prabu, C.H. Yang // *Surf. Coat. Technol.* 2020. V. 397. P. 126055.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126055>
34. **Combined** surface hardening and laser patterning approach for functionalising stainless steel surfaces / A. Garcia-Giron, J.M. Romano, Y. Liang, B. Dashtbozorg, H. Dong, P. Penchev, S.S. Dimov // *Appl. Surf. Sci.* 2018. V. 439. P. 516–524.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.012>
35. **Droplet** impact on the super-hydrophobic surface with micro-pillar arrays fabricated by hybrid laser ablation and silanization process / Z. Xia, Y. Xiao, Z. Yang, L. Li, S. Wang, X. Liu, Y. Tian // *Mater.* 2019. V. 12. Is. 5. P. 765.
<https://doi.org/10.3390/ma12050765>
36. **Preparation** of superhydrophobic and anti-resin-adhesive surfaces with micro/nanoscale structures on high-speed steel via laser processing / L. Liang, L. Lu, D. Xing, Z. Wan, Y. Tang // *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 357. P. 57–68.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.001>
37. **Surface** micro-texturing of dual phase steel and copper by combining laser machining and electrochemical dissolution / H.S. Maharana, R. Kumar, S.V.S.N. Murty, J. Ramkumar, K. Mondal // *J. Mater. Proc. Technol.* 2019. V. 273. Is. 1. P. 116260.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116260>
38. **Femtosecond** laser irradiation of metallic surfaces: Effects of laser parameters on superhydrophobicity / S. Moradi, S. Kamal, P. Englezos, S.G. Hatzikiriakos // *Nanotechnol.* 2013. V. 24. Is. 41. P. 415302.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/41/415302>
39. **Fabrication** of ordered hierarchical structures on stainless steel by picosecond laser for modified wettability applications / X. Wang, C. Li, W. Hong, C. Ma, Y. Xing, J. Feng // *Opt. Express.* 2018. V. 26. Is. 15. P. 18998–19008.
<https://doi.org/10.1364/OE.26.018998>
40. **Kam I.K.L., Neto J.J.** Hydrophobic surface production by laser ablation on titanium alloy // *Proc. of the Conf. on Frontiers in Optics 2016.* Washington, D.C., U.S., 18–21 Sept. 2016.
<https://doi.org/10.1364/FIO.2016.JTh2A.109>
41. **Laser-induced** patterns on metals and polymers for biomimetic surface engineering / A.M. Kietzig, J. Lehr, L. Matus, F. Liang // *Proc. of the Conf. on Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XIX.* San Francisco, California, U.S., 1–6 Febr. 2014. V. 8967. P. 9–16.
<https://doi.org/10.1117/12.2042894>
42. **Formation** of porous structure with subspot size under the irradiation of picosecond laser pulses / B. Liu, W. Wang, G. Jiang, X. Mei, K. Wang, J. Wang // *J. Nanomater.* 2013. V. 2013. Is. 2. P. 301301.
<https://doi.org/10.1155/2013/301301>
43. **A novel** icephobic strategy: The fabrication of biomimetic coupling micropatterns of superwetting surface / X. Li, G. Wang, B. Zhan, S. Li, Z. Han, Y. Liu // *Adv. Mater. Interfaces.* 2019. V. 6. Is. 19. P. 1900864.
<https://doi.org/10.1002/admi.201900864>
44. **Anti-icing** property of bio-inspired micro-structure superhydrophobic surfaces and heat transfer model / Y. Liu, X. Li, J. Jin, J. Liu, Y. Yan, Z. Han, L. Ren // *Appl. Surf. Sci.* 2017. V. 400. P. 498–505.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.12.219>
45. **Fabrication** of bio-inspired non-fluorinated superhydrophobic surfaces with anti-icing property and its wettability transformation analysis / X. Li, G. Wang, F.S. Moita, C. Zhang, S. Wang, Y. Liu // *Appl. Surf. Sci.* 2020. V. 505. P. 144386.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144386>
46. **Biomimetic** robust superhydrophobic stainless-steel surfaces with antimicrobial activity and molecular dynamics simulation / S. Li, Y. Liu, Z. Zheng, X. Liu, H. Huang, Z. Han, L. Ren // *Chem. Eng. J.* 2019. V. 372. P. 852–861.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.200>
47. **Designing** stainless steel surfaces with anti-pitting properties applying laser ablation and organofluorine coatings / E. Armelin, S. Moradi, S.G. Hatzikiriakos, C. Alemán // *Adv. Eng. Mater.* 2018. V. 20. Is. 6. P. 1700814.
<https://doi.org/10.1002/adem.201700814>
48. **Moradi S., Kamal S., Hatzikiriakos S.G.** Superhydrophobic laser-ablated stainless steel substrates exhibiting cassie-baxter stable state // *Surf. Innovations.* 2015. V. 3. Is. 3. P. 151–163.
<https://doi.org/10.1680/sufi.15.00001>
49. **Laser-induced** nanoscale superhydrophobic structures on metal surfaces / R. Jagdheesh, B. Pathiraj, E. Karatay, G.R.B.E. Römer, A. Huis in't Veld // *Langmuir.* 2011. V. 27. Is. 13. P. 8464–8469.
<https://doi.org/10.1021/la2011088>
50. **Razi S.M., Mollabashi M., Madanipour K.** Nanosecond laser surface patterning of bio Grade 316L stainless steel for controlling its wettability characteristics // *Int. J. Opt. Photonics.* 2015. V. 9. Is. 1. P. 43–47.
51. **Nanosecond** laser fabrication of hydrophobic stainless steel surfaces: The impact on microstructure and corrosion resistance / M. Rafieezad, J.A.C. Jaffer, Cui, X. Duan, A. Nasiri // *Mater.* 2018. V. 11. Is. 9. P. 1577–1591.
<https://doi.org/10.3390/ma11091577>
52. **Laser** ablation of metal substrates for super-hydrophobic effect / M. Tang, V. Shim, Z.Y. Pan, Y.S. Choo, M.H. Hong // *J. Laser Micro/Nanoeng.* 2011. V. 6. Is. 1. P. 6–9.
<https://doi.org/10.2961/jlmm.2011.01.0002>

53. **Fabrication** of super-hydrophobic and highly oleophobic Ti–6Al–4V surfaces by a hybrid method / Z. Pu, D. Zhang, X. Jing, Z. Yang, C. Yang, K.F. Ehmann // *Mater. Res. Bull.* 2020. Is. 130. P. 110915. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2020.110915>
54. **Kietzig A.M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P.** Ice friction: The effects of surface roughness, structure, and hydrophobicity // *J. Appl. Phys.* 2009. V. 106. Is. 2. P. 024303. <https://doi.org/10.1063/1.3173346>
55. **Tanvir Ahmed K.M., Kietzig A.M.** Drag reduction on laser-patterned hierarchical superhydrophobic surfaces // *Soft Matter*. 2016. V. 12. Is. 22. P. 4912–4922. <https://doi.org/10.1039/C6SM00436A>
56. **Bio-inspired** micro-nano structured surface with structural color and anisotropic wettability on Cu substrate / Y. Liu, S. Li, S. Niu, X. Cao, Z. Han, L. Ren // *Appl. Surf. Sci.* 2016. V. 379. P. 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.03.234>
57. **Corrosion** resistance controllable of biomimetic superhydrophobic microstructured magnesium alloy by controlled adhesion / D. Li, H. Wang, D. Luo, Y. Liu, Z. Han, L. Ren // *Surf. Coat. Technol.* 2018. V. 347. P. 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.04.078>
58. **Anti-corrosion** behaviour of superwetting structured surfaces on Mg-9Al-1Zn magnesium alloy / D. Wei, J. Wang, H. Wang, Y. Liu, S. Li, D. Li // *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 483. P. 1017–1026. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.286>
59. **Surface** geometrical model modification and contact angle prediction for the laser patterned steel surface / B.H. Luo, P.W. Shum, Z.F. Zhou, K.Y. Li // *Surf. Coat. Technol.* 2010. V. 205. Is. 7. P. 2597–2604. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.10.003>
60. **Shum P.W., Zhou Z.F., Li K.Y.** To increase the hydrophobicity, non-stickiness and wear resistance of DLC surface by surface texturing using a laser ablation process // *Tribol. Int.* 2014. V. 78. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.04.026>
61. **Preparation** of hydrophobic surface on steel by patterning using laser ablation process / B.H. Luo, P.W. Shum, Z.F. Zhou, K.Y. Li // *Surf. Coat. Technol.* 2010. V. 204. Is. 8. P. 1180–1185. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.10.043>
62. **Unification** of the textures formed on aluminum after laser treatment / G.V. Kuznetsov, D.V. Feoktistov, E.G. Orlova, K. Batishcheva, S.S. Ilenok // *Appl. Surf. Sci.* 2018. V. 469. P. 974–982. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.046>
63. **Shum P.W., Zhou Z.F., Li K.Y.** To increase the hydrophobicity and wear resistance of diamond-like carbon coatings by surface texturing using laser ablation process // *Thin Solid Films*. 2013. V. 544. P. 472–476. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.02.075>
64. **Droplet** state and mechanism of contact line movement on laser-textured aluminum alloy surfaces / G.V. Kuznetsov, D.V. Feoktistov, E.G. Orlova, I.Y. Zykov, A.G. Islamova // *J. Colloid Interface Sci.* 2019. V. 553. Is. 2. P. 557–566. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.06.059>
65. **Nano** and microstructuring of materials' surfaces using femtosecond laser pulses / A.I. Gavrilo, D.V. Golovin, A.M. Emelyanenko, D.A. Zayarny, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, S.V. Makarov, P.N. Saltuganov, L.B. Boynovich // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2016. V. 80. P. 358–361. <https://doi.org/10.3103/S1062873816040122>
66. **Superhydrophobic** structures on 316L stainless steel surfaces machined by nanosecond pulsed laser / Y. Cai, W. Chang, X. Luo, A.M.L. Sousa, K.H.A. Lau, Y. Qin // *Precis. Eng.* 2018. V. 52. P. 266–275. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.01.004>
67. **A hybrid** laser ablation and chemical etching process for manufacturing nature-inspired anisotropic superhydrophobic structures / Y. Cai, X. Luo, Z. Xu, K.H.A. Lau, F. Ding, Y. Qin // *Proc. of the 19th Intern. Conf. and Exhibition. Bilbao, Spain, 3–7 June 2019.*
68. **Influence** of roughness achieved by periodic structures on the wettability of aluminum using direct laser writing and direct laser interference patterning technology / S. Milles, B. Voisiat, M. Nitschke, A.F. Lasagni // *J. Mater. Process. Technol.* 2019. V. 270. P. 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.023>
69. **Aguilar-Morales A.I., Alamri S., Lasagni A.F.** Microfabrication of high aspect ratio periodic structures on stainless steel by picosecond direct laser interference patterning // *J. Mater. Process. Technol.* 2017. V. 252. P. 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.039>
70. **The role** of the surface nano-roughness on the wettability performance of microstructured metallic surface using direct laser interference patterning / A.I. Aguilar-Morales, S. Alamri, B. Voisiat, T. Kunze, A.F. Lasagni // *Mater.* 2019. V. 12. Is. 17. P. 2737. <https://doi.org/10.3390/ma12172737>
71. **Nanosecond** laser induced microstructure features and effects thereof on the wettability in zirconia / X. Jing, Z. Pu, S. Zheng, F. Wang, H. Qi // *Ceramics Int.* 2020. V. 46. Is. 15. P. 24173. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.197>
72. **Investigation** of wettability of zirconia by nanosecond laser treatment / X. Jing, C. Yang, S. Zheng, X. Chen, Y. Zhao // *Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO). Hangzhou, China, 13–17 Aug. 2018.* P. 10–13. <https://doi.org/10.1109/3M-NANO.2018.8552196>
73. **Wettability** modification of zirconia by laser surface texturing and silanization / Z. Pu, X. Jing, C. Yang, F. Wang, K.F. Ehmann // *Int. J. Appl. Ceramic Technol.* 2020. V. 17. Is. 5. P. 2182–2192. <https://doi.org/10.1111/ijac.13579>
74. **Fabrication** of antireflection surfaces with superhydrophobic property for titanium alloy by nanosecond laser

- irradiation / J. Li, J. Xu, Z. Lian, Z. Yu, H. Yu // *Opt. Laser Technol.* 2020. V. 126. Is. 3. P. 106129.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106129>
75. **Nanosecond** laser texturing with hexagonal honeycomb micro-structure on titanium for improved wettability and optical properties / Y. Wang, C. Ke, T. Wu, X. Zhao, R. Wang // *Optik.* 2019. V. 192. P. 162953.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.162953>
76. **Fabrication** of porous copper surfaces by laser micromilling and their wetting properties / D. Deng, W. Wan, Y. Xie, Q. Huang, X. Chen // *Precis. Eng.* 2017. V. 49. P. 428–439.
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.04.005>
77. **Ultrashort** pulsed laser surface patterning of titanium to improve osseointegration of dental implants / C. Zwahr, A. Welle, T. Weingärtner, C. Heinemann, B. Kruppke, N. Gulow, M.G. Holthaus, A. Fabián Lasagni // *Adv. Eng. Mater.* 2019. V. 21. Is. 12. P. 1900639.
<https://doi.org/10.1002/adem.201900639>
78. **Corrosion** behavior of superhydrophobic aluminum alloy in concentrated potassium halide solutions: When the specific anion effect is manifested / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, A.D. Modestov, A.G. Domantovsky, A.A. Shiryayev, K.A. Emelyanenko, O.V. Dvoretzkaya, A.A. Ganne // *Corros. Sci.* 2016. V. 112. P. 517–527.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.08.019>
79. **Corrosion** behavior of superhydrophobic coatings on aluminum-magnesium alloy in potassium iodide solutions / A.M. Emelyanenko, L.B. Boinovich, A.D. Modestov, A.G. Domantovsky, K.A. Emelyanenko, O.V. Dvoretzkaya // *J. Electrochem. Soc.* 2016. V. 163. Is. 10. P. C659–C665.
<https://doi.org/10.1149/2.06781610jes>
80. **Synergistic** effect of superhydrophobicity and oxidized layers on corrosion resistance of aluminum alloy surface textured by nanosecond laser treatment / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, A.D. Modestov, A.G. Domantovsky, K.A. Emelyanenko // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015. V. 7. Is. 34. P. 19500–19508.
<https://doi.org/10.1021/acsami.5b06217>
81. **Superhydrophobic** corrosion resistant coatings for copper via IR nanosecond laser processing / K.A. Emelyanenko, N.A. Sanzharovsky, E.V. Chulkova, A.A. Ganne, A.M. Emelyanenko, L.B. Boinovich // *Mater. Res. Express.* 2018. V. 5. Is. 11. P. 115001.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/aadc16>
82. **Effective** antibacterial nanotextured surfaces based on extreme wettability and bacteriophage seeding / L.B. Boinovich, E.B. Modin, A.V. Aleshkin, K.A. Emelyanenko, E.R. Zulkarneev, I.A. Kiseleva, A.L. Vasiliev, A.M. Emelyanenko // *ACS Appl. Nano Mater.* 2018. V. 1. Is. 3. P. 1348–1359.
<https://doi.org/10.1021/acsanm.8b00090>
83. **Femtosecond** laser manufacturing of highly hydrophobic hierarchical structures fabricated by combining surface microstructures and lips / M. Martínez-Calderon, A. Rodríguez, A. Dias Ponte, M. Gomez Aranzadi, S. Olaizola // *Proc. of the Conf. on Lasers in Manufacturing.* Munich, Germany, 22–25 June 2015.
84. **Anti-biofouling** superhydrophobic surface fabricated by picosecond laser texturing of stainless steel / K. Sun, H. Yang, W. Xue, A. He, D. Zhu, W. Liu, K. Adeyemi, Y. Cao // *Appl. Surf. Sci.* 2017. V. 436. P. 263–267.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.012>
85. **Jagdheesh R.** Fabrication of a superhydrophobic Al₂O₃ surface using picosecond laser pulses // *Langmuir.* 2014. V. 30. Is. 40. P. 12067–12073.
<https://doi.org/10.1021/la5033527>
86. **Robust** fabrication of μ -patterns with tunable and durable wetting properties: hydrophilic to superhydrophobic via a vacuum process / R. Jagdheesh, M. Diaz, S. Marimuthu, J.L. Ocaña // *J. Mater. Chem. A.* 2017. V. 5. Is. 15. P. 7125–7136.
<https://doi.org/10.1039/C7TA01385J>
87. **Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Emelyanenko K.A.** Effect of decanol vapors on the delay in water droplet crystallization on superhydrophobic substrates // *J. Phys. Chem. C.* 2015. V. 119. Is. 16. P. 8718–8724.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b00990>
88. **Sayfutdinova A.R., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B.** Influence of dodecanol on wetting behavior of superhydrophobic surfaces // *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2018. V. 54. Is. 1. P. 131–141.
<https://doi.org/10.5277/ppmp1834>
89. **Application** of laser micro- and nanotexturing for the fabrication of superhydrophobic corrosion-resistant coatings on aluminum / A.D. Modestov, K.A. Emelyanenko, A.M. Emelyanenko, A.G. Domantovsky, L.B. Boinovich // *Russian Chem. Bull.* 2016. V. 65. Is. 11. P. 2607–2611.
<https://doi.org/10.1007/s11172-016-1625-3>
90. **Fabrication** of multi-scale periodic surface structures on Ti–6Al–4V by direct laser writing and direct laser interference patterning for modified wettability applications / D. Huerta-Murillo, A.I. Aguilar-Morales, S. Alamri, J.T. Cardoso, R. Jagdheesh, A.F. Lasagni, J.L. Ocaña // *Opt. Lasers Eng.* 2017. V. 98. P. 134–142.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.06.01>
91. **Texturing** of metallic surfaces for superhydrophobicity by water jet guided laser micro-machining / Y. Shi, Z. Jiang, J. Cao, K.F. Ehmann // *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 500. Is. 9. P. 144286.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.09.012>
92. **Wettability** modification of laser-fabricated hierarchical surface structures in Ti–6Al–4V titanium alloy / D. Huerta-Murillo, A. García-Girón, J.M. Romano, J.T. Cardoso, F. Cordovilla, M. Walker, S.S. Dimov, J.L. Ocaña // *Appl. Surf. Sci.* 2018. V. 463. P. 838–846.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.09.012>
93. **Laser** textured superhydrophobic surfaces and their applications for homogeneous spot deposition / V.D. Ta, A. Dunn, T.J. Wasley, J. Li, R.W. Kay, J. Stringer, P.J. Smith, E. Esenturk, C. Connaughton, J.D. She-

- phard // *Appl. Surf. Sci.* 2016. V. 365. P. 153–159.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.01.019>
94. **Superhydrophobicity** on hierarchical periodic surface structures fabricated via direct laser writing and direct laser interference patterning on an aluminium alloy / J.T. Cardoso, A.I. Aguilar-Morales, S. Alamri, D. Huerta-Murillo, F. Cordovilla, A.F. Lasagni, J.L. Ocaña // *Opt. Lasers Eng.* 2018. V. 111. P. 193–200.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.08.005>
 95. **Modification** of Ti6Al4V surface properties by combined DLW-DLIP hierarchical micro-nano structuring / J.L. Ocaña, D. Huerta-Murillo, A.F. Lasagni, A.I. Aguilar-Morales, S. Alamri, J.T. Cardoso, A. García-Beltrán, F. Cordovilla, I. Angulo // *Adv. Opt. Technol.* 2020. V. 9. Is. 3. P. 121–130.
<https://doi.org/10.1515/aot-2019-0071>
 96. **Influence** of ambient conditions on the evolution of wettability properties of an IR-, Ns-laser textured aluminium alloy / J.T. Cardoso, A. Garcia-Girón, J.M. Romano, D. Huerta-Murillo, R. Jagdheesh, M. Walker, S.S. Dimov, J.L. Ocaña // *RSC Adv.* 2017. V. 7. Is. 63. P. 39617–39627.
<https://doi.org/10.1039/C7RA07421B>
 97. **Design** rules for laser-treated icephobic metallic surfaces for aeronautic applications / V. Vercillo, S. Tonnicchia, J.M. Romano, A. García-Girón, A.I. Aguilar-Morales, S. Alamri, S.S. Dimov, T. Kunze, A.F. Lasagni, E. Bonaccorso // *Adv. Funct. Mater.* 2020. V. 30. Is. 16. P. 1910268.
<https://doi.org/10.1002/adfm.201910268>
 98. **Misyura S.Y.** Dependence of wettability of microtextured wall on the heat and mass transfer: simple estimates for convection and heat transfer // *Int. J. Mech. Sci.* 2019. V. 170. P. 105353.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105353>
 99. **Boinovich L., Emelyanenko A.M.** The role of water vapor desublimation in the adhesion of an iced droplet to a superhydrophobic surface // *Langmuir.* 2014. V. 30. Is. 42. P. 12596–12601.
<https://doi.org/10.1021/la503447f>
 100. **Antifouling** biomimetic liquid-infused stainless steel: Application to dairy industrial processing / S. Zouaghi, T. Six, S. Bellayer, S. Moradi, S.G. Hatzikiriakos, T. Dargent, V. Thomy, Y. Coffinier, C. André, G. Delaplace, M. Jimenez // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017. V. 9. Is. 31. P. 26565–26573.
<https://doi.org/10.1021/acsami.7b06709>
 101. **Hydrophobicity**, freezing delay and morphology of laser-treated aluminum surfaces / V.J. Rico, C. López-Santos, M. Villagrà, J.P. Espinós, G.F. de la Fuente, L.A. Angurel, A. Borrás, A. González-Elipe // *Langmuir.* 2019. V. 35. Is. 19. P. 6483–6491.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00457>
 102. **Condensation** of water vapor underneath an inclined hydrophobic textured surface machined by laser and electric discharge / G.B. Shirsath, K. Muralidhar, R.G.S. Pala, J. Ramkumar // *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 484. P. 999–1009.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.076>
 103. **Fabrication** of micro-/nano-structured super-hydrophobic fluorinated polymer coatings by cold-spray / K. Ravi, W.L. Sulen, C. Bernard, Y. Ichikawa, K. Ogawa // *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 373. P. 17–24.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.078>
 104. **Sharp M., Rosowski A., French P.** Nanosecond laser texturing of aluminium for control of wettability // *Proc. of the Industrial Laser Applications Symposium (ILAS 2015).* Kenilworth, U. K., 1 July 2015. V. 9567. P. 96570J.
<https://doi.org/10.1117/12.2179929>
 105. **Nanostructure** fabrication on the top of laser-made micropillars for enhancement of water repellence of aluminium alloy / P. Hauschwitz, R. Jagdheesh, D. Rostohar, J. Brajer, J. Kopeček, P. Jiříček, J. Houdková, T. Mocek // *Mater. Lett.* 2019. V. 256. P. 126601.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126601>
 106. **Boinovich L.B., Emelyanenko A.M.** The behaviour of fluoro- and hydrocarbon surfactants used for fabrication of superhydrophobic coatings at solid/water interface // *Colloids Surf., A.* 2015. V. 481. P. 167–175.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.05.00>
 107. **Hydrophilic** to ultrahydrophobic transition of Al 7075 by affordable Ns fiber laser and vacuum processing / P. Hauschwitz, R. Jagdheesh, D. Rostohar, J. Brajer, J. Kopeček, P. Jiříček, J. Houdková, T. Mocek // *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 505. P. 144523.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144523>
 108. **Применение** лазерного нанотекстурирования поверхности материалов с целью придания требуемых функциональных свойств / К.А. Емельяненко, А.Р. Сайфудинова, Е.Б. Модин, А.М. Емельяненко, Л.Б. Бойнович // Третий междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием “Новые материалы”, Москва, 21–24 ноября 2017 г. С. 73–77.
 109. **Laser-assisted** processing of aluminum alloy for the fabrication of superhydrophobic coatings with standing multiple degradation factors / N.E. Sataeva, L.B. Boinovich, K.A. Emelyanenko, A.G. Domanovsky, A.M. Emelyanenko // *Surf. Coat. Technol.* 2020. V. 397. P. 125993.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125993>
 110. **The influence** of the surface microtexture on wettability properties and drop evaporation / S.Y. Misyura, G.V. Kuznetsov, D.V. Feoktistov, R.S. Volkov, V.S. Morozov, E.G. Orlova // *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 375. Is. 12. P. 458–467.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.05>
 111. **The influence** of the wall microtexture on functional properties and heat transfer / S.Y. Misyura, P.A. Strizhak, R.S. Volkov, V.S. Morozov // *J. Mol. Liq.* 2019. V. 294. P. 111670.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111670>
 112. **Misyura S.Y.** Heat transfer and convection of evaporating sessile droplets in transition from superhydrophilic to superhydrophobic structured wall: Optimization of functional properties // *Int. Commun. Heat*

- Mass Transfer. 2020. V. 112. P. 104474.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104474>
113. **Femtosecond** laser produced hydrophobic hierarchical structures on additive manufacturing parts / L. Jiao, Z. Chua, S. Moon, J. Song, G. Bi, H. Zheng // *Nanomater.* 2018. V. 8. Is. 8. P. 601.
<https://doi.org/10.3390/nano8080601>
114. **Pulsed** laser induced triple layer copper oxide structure for durable polyfunctionality of superhydrophobic coatings / L.B. Boinovich, K.A. Emelyanenko, A.G. Domantovsky, E.V. Chulkova, A.A. Shiryaev, A.M. Emelyanenko // *Adv. Mater. Interfaces.* 2018. V. 5. Is. 21. P. 1801099.
<https://doi.org/10.1002/admi.201801099>
115. **Fabrication** of hydrophobic structures by nanosecond pulse laser / Y. Cai, A.M.L. Sousa, K.H.A. Lau, W. Chang, X. Luo. 2017. Project: EU H2020 ITN MICROMAN “Process Fingerprint for Zero-defect Netshape MICROMANufacturing”. <http://www.micro-man.mek.dtu.dk/>
116. **Product** and process fingerprint for nanosecond pulsed laser ablated superhydrophobic surface / Y. Cai, X. Luo, Z. Liu, Y. Qin, W. Chang, Y. Sun // *Micromachines.* 2019. V. 10. Is. 2. P. 177–182.
<https://doi.org/10.3390/mi1003017>
117. **Dynamic** behaviours of water droplets impacting on laser ablated surfaces / Y. Cai, X. Luo, Y. Tian, R.M.M. Hasan, W. Chang, Y. Qin // *Colloids Surf., A.* 2019. V. 580. P. 123743.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123743>
118. **Nanosecond** laser micro- and nanotexturing for the design of a superhydrophobic coating robust against long-term contact with water, cavitation, and abrasion / A.M. Emelyanenko, F.M. Shagieva, A.G. Domantovsky, L.B. Boinovich // *Appl. Surf. Sci.* 2015. V. 332. P. 513–517.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.202>
119. **Superhydrophobic** stainless steel surface by two-step ns laser processing / P. Hauschwitz, R. Bicistova, R. Jagdheesh, J. Brajer, D. Rostohar // *MM Sci. J.* 2019. V. 2019. Is. 5. P. 3647–3651.
https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_12_2019116
120. **Experimental** investigation of processing disturbances in laser surface patterning / A. Garcia-Giron, J.M. Romano, A. Batal, A. Michałek, P. Penchev, S.S. Dimov // *Opt. Lasers Eng.* 2020. V. 126. P. 105900.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105900>
121. **Triangular** laser-induced submicron textures for functionalising stainless steel surfaces / J.M. Romano, A. Garcia-Giron, P. Penchev, S. Dimov // *Appl. Surf. Sci.* 2018. V. 440. P. 162–169.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.086>
122. **Tran N.G., Chun D.M.** Simple and fast surface modification of nanosecond-pulse laser-textured stainless steel for robust superhydrophobic surfaces // *CIRP Annals.* 2020. V. 69. Is. 1. P. 525–528.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.012>
123. **Ngo C.V., Chun D.M.** Fast wettability transition from hydrophilic to superhydrophobic laser-textured stainless steel surfaces under low-temperature annealing // *Appl. Surf. Sci.* 2017. V. 409. P. 232–240.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.038>
124. **Fabrication** of hydrophobic structures on stent by direct three-beam laser interference lithography / L. Gao, W. Zhou, Y. Wang, S. Wang, C. Bai, S. Li, B. Liu, J. Wang, Y.L. Li // *Optik.* 2016. V. 127. Is. 13. P. 5211–5214.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.02.075>
125. **Nanostructuring** of laser textured surface to achieve superhydrophobicity on engineering metal surface / A. Samanta, Q. Wang, S.K. Shaw, H. Ding // *J. Laser Appl.* 2019. V. 31. P. 022515.
<https://doi.org/10.2351/7.0004122>
126. **Biomimetic** surface structuring using laser based interferometric methods / A.F. Lasagni, S. Alamri, A.I. Aguilar-Morales, F. Rößler, B. Voisiat, T. Kunze // *Appl. Sci.* 2018. V. 8. Is. 8. P. 1260.
<https://doi.org/10.3390/app8081260>
127. **Vorobyev A.Y., Guo C.** Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses // *J. Appl. Phys.* 2015. V. 117. Is. 3. P. 033103.
<https://doi.org/10.1063/1.4905616>
128. **Dinh T.H., Ngo C.V., Chun D.M.** Controlling the wetting properties of superhydrophobic titanium surface fabricated by UV nanosecond-pulsed laser and heat treatment // *Nanomater.* 2018. V. 8. Is. 10. P. 766.
<https://doi.org/10.3390/nano8100766>
129. **Ngo C.V., Chun D.M.** Effect of heat treatment temperature on the wettability transition from hydrophilic to superhydrophobic on laser-ablated metallic surfaces // *Adv. Eng. Mater.* 2018. V. 20. Is. 7. P. 1701086.
<https://doi.org/10.1002/adem.201701086>
130. **Hybrid** laser and vacuum process for rapid ultrahydrophobic Ti-6Al-4V surface formation / R. Jagdheesh, M. Diaz, S. Marimuthu, J.L. Ocaña // *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 471. P. 759–766.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.12.047>
131. **Lang V., Voisiat B., Lasagni A.F.** High throughput direct laser interferential patterning of aluminum for fabrication of super hydrophobic surfaces // *Mater.* 2019. V. 12. Is. 9. P. 1484.
<https://doi.org/10.3390/ma12091484>
132. **Ngo C.V., Chun D.M.** Fabrication of un-coated transparent superhydrophobic sapphire surface using laser surface ablation and heat treatment // *CIRP Ann.* 2018. V. 67. Is. 1. P. 571–574.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.085>
133. **Ngo C.V., Chun D.M.** Control of laser-ablated aluminum surface wettability to superhydrophobic or superhydrophilic through simple heat treatment or water boiling post-processing // *Appl. Surf. Sci.* 2017. V. 435. P. 974–982.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.185>
134. **Ocaña J.L., Jagdheesh R., García-Ballesteros J.J.** Direct generation of superhydrophobic microstructures

- in metals by UV laser sources in the nanosecond regime // *Adv. Opt. Technol.* 2016. V. 5. Is. 1. P. 87–93. <https://doi.org/10.1515/aot-2016-0002>
135. **De Lara L.R., Jagdheesh R., Ocaña J.L.** Corrosion resistance of laser patterned ultrahydrophobic aluminium surface // *Mater. Lett.* 2016. V. 184. P. 100–103. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.08.022>
 136. **Non-fluorinated** superhydrophobic Al7075 aerospace alloy by laser processing / R. Jagdheesh, P. Hauschwitz, J. Mužík, J. Brajer, D. Rostohar, P. Jiříček, J. Kopeček, T. Mocek // *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 493. P. 287–293. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.035>
 137. **Chun D.M., Ngo C.V., Lee K.M.** Fast fabrication of superhydrophobic metallic surface using nanosecond laser texturing and low-temperature annealing // *CIRP Ann.* 2016. V. 65. Is. 1. P. 519–522. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.019>
 138. **Fabrication** of superhydrophobic Cu surfaces with tunable regular micro and random nano-scale structures by hybrid laser texture and chemical etching / C. Dong, Y. Gu, M. Zhong, L. Li, K. Sezer, M. Ma, W. Liu // *J. Mater. Process. Technol.* 2011. V. 211. Is. 7. P. 1234–1240. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.02.007>
 139. **Femtosecond** laser microstructured alumina toughened zirconia: A new strategy to improve osteogenic differentiation of Cs / A. Carvalho, L. Canguero, V. Oliveira, R. Vilar, M.H. Fernandes, F.J. Monteiro // *Appl. Surf. Sci.* 2017. V. 435. P. 1237–1245. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.206>
 140. **Experimental** study of droplet shedding on laser-patterned substrates / S. Moghtadernejad, M. Jadidi, K.M.T. Ahmmed, C. Lee, A. Dolatabadi, A.M. Kietzig // *Phys. Fluids.* 2019. V. 31. Is. 12. P. 122107. <https://doi.org/10.1063/1.5126048>
 141. **Reducing** ice adhesion on nonsmooth metallic surfaces: Wettability and topography effects / E.J.Y. Ling, V. Uong, J.S. Renault-Crispo, A.M. Kietzig, P. Servio // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2016. V. 8. Is. 13. P. 8789–8800. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b00187>
 142. **Femtosecond** laser microstructuring of alumina toughened zirconia for surface functionalization of dental implants / A. Carvalho, L. Grenho, M.H. Fernandes, A. Daskalova, A. Trifonov, I. Buchvarov, F.J. Monteiro // *Ceram. Int.* 2019. V. 46. Is. 2. P. 1383–1389. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.101>
 143. **Tang M., Hong M., Choo Y.S.** Hydrophobic surface fabrication by laser micropatterning // *Proc. of the IEEE.* Singapore, 8–11 Dec. 2008. <https://doi.org/10.1109/IPGC.2008.4781512>
 144. **Laser** texturing of alumina surface for improved hydrophobicity / B.S. Yilbas, M. Khaled, N. Abu-Dheir, N. Aqeeli, S.Z. Furquan // *Appl. Surf. Sci.* 2013. V. 286. P. 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.040>
 145. **Effect** of environmental dust particles on laser textured yttria-stabilized zirconia surface in humid air ambient / B.S. Yilbas, H. Ali, A. Al-Sharafi, F. Al-Sulaiman, C. Karatas // *Opt. Laser Technol.* 2017. V. 101. P. 388–396. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.11.052>
 146. **Laser** treatment of a neodymium magnet and analysis of surface characteristics / B.S. Yilbas, H. Ali, M. Rizwan, M. Kassas // *Opt. Laser Technol.* 2016. V. 82. P. 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.03.003>
 147. **Laser** surface treatment of aluminum based composite mixed with B₄C particles / B.S. Yilbas, C. Karatas, H. Karakoc, B.J.A. Aleem, S. Khan, N. Al-Aqeeli // *Opt. Laser Technol.* 2015. V. 66. P. 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.08.014>
 148. **Jagdheesh R., García-Ballesteros J.J., Ocaña J.L.** One-step generation of ultrahydrophobic aluminum surface patterns by nanosecond lasers // *Proc. of the Conf. on Lasers in Manufacturing.* Munich, Alemania, 22–25 June 2015.
 149. **Jagdheesh R., García-Ballesteros J.J., Ocaña J.L.** One-step fabrication of near superhydrophobic aluminium surface by nanosecond laser ablation // *Appl. Surf. Sci.* 2016. V. 374. P. 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.104>
 150. **Effect** of surface area on the wettability of dual micro- and nanostructures fabricated by laser interference lithography / L. Dong, Q. Liu, Y. Liu, W. Li, Z. Wang, D. Li // *Proc. of the Intern. Conf. on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO).* Changchun, China, 5–9 Oct. 2015. P. 163–164. <https://doi.org/10.1109/3M-NANO.2015.7425512>
 151. **Jagdheesh R., Diaz M., Ocaña J.L.** Bio inspired self-cleaning ultrahydrophobic aluminium surface by laser processing // *RSC Adv.* 2016. V. 6. Is. 77. P. 72933–72941. <https://doi.org/10.1039/c6ra12236a>
 152. **Spreading** of a distilled water droplet over polished and laser-treated aluminum surfaces / E.G. Orlova, D.V. Feoktistov, G.V. Kuznetsov, K.O. Ponomarev // *Eur. J. Mech. B: Fluids.* 2017. Is. 68. P. 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2017.12.002>
 153. **Comment** on “Nanosecond laser textured superhydrophobic metallic surfaces and their chemical sensing applications” by Duong V. Ta, Andrew Dunn, Thomas J. Wasley, Robert W. Kay, Jonathan Stringer, Patrick J. Smith, Colm Connaughton, Jonathan D. Shephard in *Appl. Surf. Sci.* 2015. V. 357. P. 248–254. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.09.027> / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, K.A. Emelyanenko, A.G. Domantovsky, A.A. Shiryayev // *Appl. Surf. Sci.* 2016. V. 379. P. 111–113. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.056>
 154. **Jagdheesh R., Ocaña J.L.** Laser machined ultralow water adhesion surface by low pressure processing // *Mater. Lett.* 2020. V. 270. P. 127721. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127721>

Creation of Hydrophobic Functional Surfaces of Structural Materials on the Basis of Laser Ablation (Review)

A. V. Ragutkin^{a, *}, M. R. Dasaev^a, O. V. Kalakutskaya^a, O. S. Zilova^a, and E. S. Trushin^a

^a MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

*e-mail: dasaev@mirea.ru

Abstract—Over the past decade, interest has increased in controlling the wettability of metal surfaces with various liquids. In particular, the use of hydrophobic functional surfaces improves the efficiency and reliability of thermal power plants and systems operating in various areas of life. One of the most promising ways to achieve a hydrophobic state of structural materials is surface modification using laser equipment: laser ablation. As a result of exposure to laser radiation, melting, evaporation and recrystallization of the surface layer of the metal occur. By varying the parameters of exposure to laser radiation, it is possible to form a relief with specified geometric characteristics on a metal surface. The creation of hydrophobic metal surfaces using laser equipment includes the following steps: choosing the type of laser source, determining the radiation parameters and the trajectory of the laser beam over the surface, preparing the initial surface, forming the relief, and reducing the surface energy after laser ablation. This paper presents an overview of the results of research on the creation of hydrophobic metal surfaces based on the formation of a structured relief. In most studies, a relief was formed on the surface of metal samples in the form of equidistant lines, a grid, or had no pronounced structure (irregular structure). It has been established that the hydrophobic state of a metal surface with the highest contact angles (more than 150°) is achieved by laser texturing of the relief in the form of equidistant lines or a grid with a step not exceeding 100 μm. The maximum contact angle (approximately 179°) was obtained by forming a relief in the form of a grid with mutually perpendicular lines equidistant at 15 and 20 μm.

Keywords: laser texturing, laser ablation, metal surfaces, relief, wettability, hydrophobicity, surface roughness, surface energy reduction