

УДК 536.4

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПУТЕМ СМЕЩЕНИЯ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА ВТОРОГО РОДА В ОБЛАСТЬ БОЛЕЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Феоктистов Дмитрий Владимирович¹,
fdv@tpu.ru

Кузнецов Гений Владимирович¹,
kuznetsovgv@tpu.ru

Абедтазехабади Акрам¹,
abedtazehabadi@tpu.ru

Орлова Евгения Георгиевна¹,
lafleur@tpu.ru

Бондарчук Степан Петрович¹,
spb7@tpu.ru

Дорожкин Александр Валерьевич¹,
avd46@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Разработка принципиально новых стратегий и технических решений, приводящих к повышению энергоэффективности и ресурсосбережения систем охлаждения энергонасыщенного оборудования невозможна без создания новых конструктивных материалов с целевыми функциональными свойствами. К перспективным системам охлаждения теплонагруженного оборудования, например, устройств связи пятого поколения 5G, с поверхности которых поступают тепловые потоки высокой плотности (до 1000 Вт/см²), относятся системы, базирующиеся на капельном орошении. Такое охлаждение позволяет повысить интенсивность и равномерность теплоотвода, значительно снизить расход теплоносителя. Но полученные к настоящему времени результаты показывают, что использование традиционных подходов (применение элементов систем охлаждения, изготовленных из стали, меди, алюминия и их сплавов, обработанных шлифовкой или полировкой) не позволяют решить задачу интенсивного охлаждения поверхностей, нагретых до высоких температур. Лазерные методы обработки теплопередающих поверхностей – один из наиболее эффективных способов интенсификации процессов испарения и кипения. В связи с развитием в последнее десятилетие лазерной техники стали доступны финансово возможные технологии создания целевых функциональных поверхностных свойств металлов. Использование на практике модифицированных лазерным излучением теплопередающих поверхностей систем охлаждения может решить ряд проблем, связанных с удовлетворением растущего глобального спроса на энергетические ресурсы, в частности, при интенсификации отвода тепловых потоков высокой плотности от элементов энергонасыщенного оборудования путем смещения кризиса теплообмена второго рода в область более высоких температур.

Цель: оценка возможности смещения кризиса теплообмена (эффекта Лейденфроста) в область более высоких температур путем модификации теплопередающих поверхностей нагрева лазерным излучением наносекундной длительности.

Методы. Методом лазерной обработки наносекундной длительности на типичных материалах, применяемых на практике при создании элементов систем охлаждения, созданы уникальные текстуры с заданными геометрическими характеристиками. Характеристики текстур определены с использованием оборудования конфокальной и электронной микроскопии. Регистрация эффекта Лейденфроста проводилась на специально изготовленной установке, оснащенной оборудованием теневого оптического метода и высокоскоростной видеорегистрации быстропротекающих физических процессов.

Результаты. Установлены режимы воздействия одиночного лазерного импульса наносекундной длительности на поверхность нержавеющей стали и алюминия, гарантирующие образование абляционного кратера. Показана возможность применимости графоаналитической методики для формирования заданной микротекстуры при обработке поверхностей металлов лазерным излучением наносекундной длительности. Лазерная обработка поверхности металлов с энергией в импульсе до 0,6 мДж позволяет за счет формируемой текстуры и супергидрофильных свойств в достаточно широких диапазонах значений управлять характеристиками кризиса кипения 2 рода, а именно температурой Лейденфроста более чем на 110 °С на поверхности алюминия и более чем на 45 °С на поверхности нержавеющей стали в атмосферных условиях при использовании дистиллированной деаэрированной воды в качестве теплоносителя.

Ключевые слова:

Кризис теплообмена, капля, поверхность, текстура, шероховатость, лазерное текстурирование.

Введение

За последнее десятилетие разработаны и внедрены в производство новые высокотехнологичные энерго- и ресурсосберегающие технологии, базирующиеся на фазовом переходе (испарении) малых объемов жидкостей (капель, тонких пленок жидкостей до 100 мкм) и превосходящие по характеристикам традиционные технологии, использующие большие объемы теплоносителей. Примерами таких технологий являются «лаборатория на чипе» [1, 2], микрофлюидное охлаждение микропроцессоров [3], системы охлаждения на базе капельного орошения [4]. Известно [5–7], что

процесс испарения капли, лежащей на поверхности, зависит от давления и влажности окружающей среды, температуры и свойств смачиваемости поверхности, наличия поверхностно-активных веществ. При подводе к теплоносителю тепловых потоков высокой плотности возникает кризис теплообмена, для капель широко известен как «эффект Лейденфроста» [8]. Последний является частным случаем пленочного кипения [9]. Капля жидкости, соприкасаясь с твердой поверхностью, температура которой значительно выше температуры кипения этой жидкости, образует между поверхностью и жидкостью теплоизолирующий слой

(«паровую подушку» [10]), характеризующийся высоким термическим сопротивлением. Температура поверхности теплонагруженного оборудования в таких случаях будет повышаться, что может привести к термическому разрушению теплопередающей поверхности и аварии охлаждаемого устройства.

Эффект Лейденфроста характеризуется продолжительным временем жизни капли в сравнении с состоянием интенсивного испарения и кипения капли на твердой поверхности [11]. Последнее обусловлено тем, что «паровая подушка» характеризуется высоким термическим сопротивлением, и, как следствие, её образование уменьшает теплоотдачу от нагретой поверхности к капле. Кроме того, зарождение паровых пузырей в капле предотвращается из-за отсутствия контакта с твердым телом. Капля в состоянии Лейденфроста характеризуется геометрической формой близкой к сфере или «фасоли» [12], а также высокой скоростью перемещения по поверхности [13, 14].

Условия реализации эффекта Лейденфроста зависят от: химического состава и текстуры поверхности, ее свободной поверхностной энергии, теплофизических свойств жидкости и твердого тела [15, 16]. На сегодняшний день не установлено, какой из факторов является доминирующим. Эффект Лейденфроста является межфазным явлением. По этой причине он, в первую очередь, зависит от химических (элементного состава) и топографических свойств поверхности (вида текстуры и шероховатости) [17–19]. Известно [18–22], что на гидрофильных поверхностях смещение температуры возникновения эффекта Лейденфроста в область более высоких температур не превышает 30 °С. Гидрофобизация поверхностей приводит к уменьшению температуры возникновения эффекта Лейденфроста не более чем на 100 °С. Также известно [18, 23], что изменение топографических свойств путем формирования текстур в виде микростолбиков или разноуровневой (микро-наноразмерной) шероховатости приводит к росту температуры возникновения эффекта Лейденфроста от 45 до 94 °С.

Лазерная обработка поверхностей металлов позволяет формировать текстуру [24], шероховатость [25] и свойства смачиваемости [26, 27] в широких диапазонах варьирования заданных характеристик. Исследования по возникновению эффекта Лейденфроста на модифицированных лазерным излучением поверхностях металлов позволяют расширить область практического применения на производстве технологий капельного орошения. В настоящее время широко известны результаты [28] по данному направлению не позволяют прогнозировать условия возникновения эффекта Лейденфроста на специально модифицированных лазерным излучением теплопередающих поверхностях. Кроме того, известные результаты [29–33] получены с использованием лазерных технологий обработки поверхностей, базирующихся на пико- и фемтосекундной длительности лазерного излучения. Последние, по сравнению с установками лазерного излучения наносекундной длительности, при внедрении в промышленное производство часто являются финансово необоснованными технологиями генера-

ции целевых функциональных поверхностных свойств металлов.

Целью работы являлась оценка возможности смещения кризиса теплообмена (эффекта Лейденфроста) в область более высоких температур путем модификации теплопередающих поверхностей нагрева лазерным излучением наносекундной длительности.

Методы исследования и используемое экспериментальное оборудование

Исследования проводились на образцах в форме пластин из нержавеющей стали марки ASTM A 240/A 240M 430 и алюминия АМГ-3 размерами 50,0×50,0×0,5 мм и 50,0×50,0×1,0 мм, соответственно. Перед модификацией лазерным излучением поверхности образцов полировались по хорошо апробированной методике [34] с целью минимизации неконтролируемого влияния поверхностных электромагнитных волн.

Формирование элементов текстуры в виде абляционных кратеров и создание заданной конфигурации текстуры на поверхностях металлов осуществлялось системой, работающей на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера (IPG Photonics, Россия). В табл. 1 приведены основные технические характеристики использовавшейся лазерной системы. Модификация образцов металла лазерным излучением проводилась в воздушной среде при температуре 20–22 °С, атмосферном давлении, относительной влажности 43–48 %. Энергия импульса определялась с помощью измерителя мощности и энергии импульсов лазерного излучения Ophir Juno (Ophir Optronics, Израиль), оснащенного пирозлектрическим датчиком Ophir PE-50-BF-DIF-C (Ophir Optronics, Израиль). Относительная погрешность измерения энергии импульса не превышала 5 %.

Таблица 1. Основные технические характеристики лазерной системы

Table 1. Main technical characteristics of the laser system

Характеристика/Characteristic	Значение Value
Длина волны основного излучения, мкм The main radiation wavelength, μm	1,064
Режим работы Working mode	Импульсный Pulse
Длительность импульсов (дискретные значения) (τ_n), нс Pulse duration (discrete values) (τ_p), ns	1, 2, 4, 8, 16, 30, 50, 120
Частота импульсов (ν), кГц Pulse frequency (ν), kHz	2–5000
Максимальная выходная мощность (N), Вт Maximum output power (N), W	50
Максимальная энергия в импульсе (E_n), мДж Maximum pulse energy (E_p), mJ	1,0
Скорость перемещения луча (ϑ), м/с Beam travel speed (ϑ), m/s	до 10 up to 10
Диаметр лазерного пятна в фокусе ($d_{л.н.}$), мкм Laser focus spot diameter ($d_{f.s.}$), μm	45

Процессы испарения капель на модифицированных поверхностях металлов исследовались на установке, схема которой представлена на рис. 1.

Капля дистиллированной деаэрированной воды – 1 помещалась одноканальным высокоточным электронным дозатором (Thermo Fisher Scientific, США) – 2 на поверхность образца – 3, нагретого до заданной температуры. Объем капли 5 мкл соответствовал типичному объему капель, генерируемых системами охлаждения, базирующимися на капельном орошении. Исследуемые процессы регистрировались теньвым оптическим методом с использованием оборудования высокоскоростной видеорегистрации быстротекающих процессов – 4 (Fast video, Россия). Плоскопа-

раллельный свет генерировался с помощью источника света (Edmund optics, США) – 5 и теллентрической оптической трубы (Edmund optics, США) – 6. Теньвые изображения получены путем обработки видеозаписей, выполненных при скорости съемки 500 к/с разрешением 1280×1024, 8 бит. Анализ изображений выполнен с использованием программного обеспечения Fast Video Lab (ООО «НПО АСТЕК», Россия). Нагрев образцов осуществлялся при помощи стеклокерамической плиты (Томь Аналит, Россия) 7 от 80 до 400 °С с шагом 1 °С.

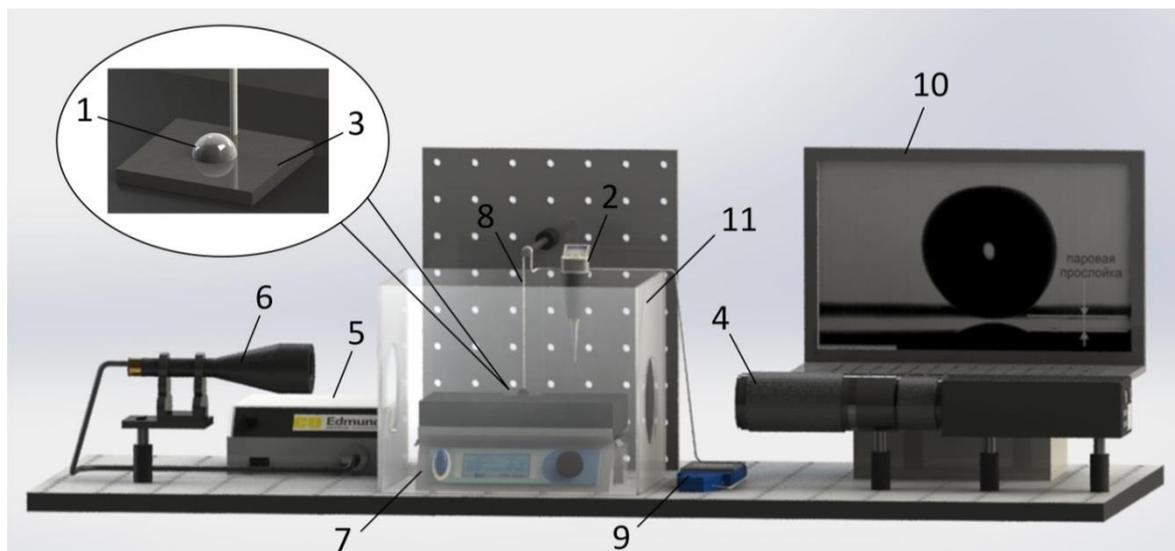


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – капля; 2 – дозатор; 3 – образец; 4 – высокоскоростная видеокамера, оснащенная макрообъективом; 5 – источник света; 6 – теллентрическая оптическая труба; 7 – стеклокерамическая плита; 8 – термопара; 9 – контроллер; 10 – персональный компьютер; 11 – бокс

Fig. 1. Experimental setup: 1 – droplet; 2 – dosing device; 3 – sample; 4 – high-speed video camera with macro lens; 5 – light source; 6 – telecentric optical tube; 7 – glass ceramic heater; 8 – thermocouple; 9 – controller; 10 – PC; 11 – box

Температура поверхности образца металла контролировалась малоинерционной термопарой хромель-алюмель (Omega, США) – 8, подключенной к контроллеру температуры – 9 (National instruments, США). Контроллер подключен к персональному компьютеру – 10. Погрешность измерения температуры не превышала $\pm 0,1$ °С. Крепление спая термопары к поверхности образца, а также образца к стеклокерамической плите осуществлялось при помощи высокотемпературной термопасты (GRIPCOTT, Франция). Температура Лейденфроста определялась по хорошо известному [12] условию формирования стабильной «паровой подушки» между каплей и поверхностью образца. На мониторе персонального компьютера – 10 (рис. 1) приведено типичное изображение капли, зарегистрированное в проведенных исследованиях в условиях возникновения эффекта Лейденфроста. Случайная погрешность определения температуры Лейденфроста при проведении двенадцати экспериментов в идентичных условиях не превышала 7 %, систематическая погрешность, обусловленная характеристиками объектива и настройками видеокамеры, не превышала 2 %.

Исключительная сверхвысокая подвижность капля при реализации эффекта Лейденфроста создает

проблемы для экспериментального наблюдения. Быстрое самопроизвольное движение капли объясняется [12] внешними воздействиями, например конвекцией окружающей среды или незначительным наклоном поверхности, в сочетании с низким трением из-за формирования «паровой подушки». С целью уменьшения влияния внешних факторов на исследуемые процессы использовался бокс – 11, изготовленный из стекла толщиной 5 мм. Все эксперименты проводились в воздушной среде при температуре 20–22 °С, атмосферном давлении, относительной влажности 43–48 %.

Свойства смачивания полированных и модифицированных лазерным излучением образцов определялись по хорошо апробированной методике [35], используя метод Юнга–Лапласа и Тангенциальный 1. Относительная погрешность определения статического контактного угла (θ) не превышала 5 %.

Анализ текстуры проводился методом электронной микроскопии по фотоизображениям высокого разрешения, полученным с помощью сканирующего микроскопа (Hitachi, Япония). Геометрические размеры элементов текстур в форме абляционных кратеров определялись по СЭМ-изображениям с известным коэффициентом масштабирования. Случайная погреш-

ность определения диаметра абляционного кратера не превышала 4 %, что составляло не более 3 мкм. Трехмерные параметры шероховатости текстуры определены методом конфокальной микроскопии с помощью программного комплекса MountainsLab. В каждой серии из двенадцати экспериментов, проводимых при идентичных начальных условиях, конфокальным датчиком (Micro-Epsilon, Германия) измерялись значения высот и впадин. Разница этих двух величин соответствует параметру шероховатости S_z , характеризующему высоту неровностей. Случайная погрешность определения параметра S_z не превышала 6,0 %, систематическая погрешность – 0,5 %. Помимо S_z , согласно рекомендациям [36, 37], для математического описания текстуры поверхностей металлов использовались 3D-параметры шероховатости: среднее арифметическое высоты (S_a) характеризует среднюю шероховатость поверхности; эксцесс (S_{ku}) характеризует форму выступов (плосковершинность); приращение относительной площади (S_{dr}) характеризует прирост площади поверхности за счет шероховатости относительно молекулярно-гладкой поверхности; плотность выступов (S_{pd}) характеризует число выступов на единице площади поверхности. Параметры S_a , S_{ku} , S_{dr} и S_{pd} определены по фотоизображениям текстуры высокого разрешения, полученным в режимах сканирования «Сомро» (композиционный контраст), «Торо» (топографический контраст), «Shadow» (стереоскопическое изображение), с последующей обработкой в программном комплексе MountainsLab по известным значениям высот неровностей (S_z). Погрешность определения параметров S_a , S_{ku} , S_{dr} и S_{pd} не превышала 8,0 %.

Результаты экспериментов и обсуждение

Известно [34], что для прогнозирования текстуры, образованной импульсным лазерным излучением наносекундной длительности, необходимо знать геометрическую форму и размеры элемента текстуры, образованного одиночным лазерным импульсом на поверхности материала, а также скорость движения луча, число линий прохода на 1 мм.

Проведены специальные эксперименты по определению геометрической формы и размеров элементов текстуры, формирующихся при воздействии однократного лазерного импульса с заданными характеристиками на поверхностях нержавеющей стали марки ASTM A 240/A 240M 430 и алюминия АМГ-3. По результатам проведенных экспериментов в условиях варьирования характеристик (выходной мощности от 10 до 100 %, длительности от 1 до 120 нс, частоты от 1 до 120 кГц) условно выделено шесть возможных режимов воздействия одиночного лазерного импульса на поверхность нержавеющей стали и алюминия: 1) режим нагрева без модификации поверхности (рис. 2, а); 2) умеренное плавление (рис. 2, б); 3) интенсивное плавление (рис. 2, в); 4) формирование абляционных кратеров, характеризующихся волнообразной формой периметра (кромки) (рис. 2, г); 5) формирование абляционных кратеров с кромкой правильной формы окружности (рис. 2, д); 6) форми-

рование абляционных кратеров с кромкой, деформированной каплями и струйками расплавленного металла (рис. 2, е).

Из условно выделенных шести режимов воздействия абляционный кратер формируется в трех. Характеристики лазерного излучения в этих трех режимах могут быть использованы для формирования текстуры с заданными геометрическими характеристиками.

По результатам анализа диаметров абляционных кратеров построены зависимости $d_{a.к.} = f(N, \tau_u, \nu)$ (рис. 3, 4), где N – выходная мощность, Вт; τ_u – длительность импульсов, нс; ν – частота импульсов, кГц.

Из сравнения зависимостей рис. 3, 4 видно, что при длительности $\tau_u = 120$ нс и частоте импульсов $\nu > 50$ кГц диаметр абляционного кратера уменьшается по сравнению с аналогичными зависимостями при $\tau_u \leq 120$ и $\nu > 50$ кГц. Последнее обусловлено техническими характеристиками работы лазерной системы, в частности накачкой лазера.

Также по результатам анализа рис. 3, 4 установлено, что диаметр абляционного кратера зависит от выходной мощности и длительности импульса, т. е. от плотности энергии в импульсе, которая определяется как [38]:

$$E_{\rho u} = \frac{4E_u}{\pi \cdot d_{л.п}^2},$$

где E_u – энергия импульса, Дж; $d_{л.п}$ – диаметр лазерного пятна, мкм.

Распределение энергии в луче лазера (т. е. $E_{\rho u}$) по поперечным координатам неравномерно, близко гауссову (от периферии к центру). Последнее является одной из причин того, что диаметр абляционного кратера не равен диаметру лазерного пятна. Кроме того, помимо характеристик лазерного импульса формирование абляционного кратера и его геометрические размеры зависят от оптических и теплофизических свойств материала. В настоящее время теоретические основы воздействия лазерного излучения на вещество не развиты на уровне, позволяющем прогнозировать аналитически или численным моделированием формирование абляционного кратера, тем более заданной текстуры. На сегодняшний день единственным широко известным возможным способом прогнозирования текстуры является использование графоаналитической методики [34]. Для использования последней необходимо знать размеры и форму абляционного кратера, которые могут быть достоверно установлены только экспериментальным путем.

По результатам проведенных исследований установлено, что изменяя характеристики лазерного излучения в диапазонах длительности импульса от 1 до 120 нс, частоты от 1 до 140 кГц, выходной мощности от 10 до 100 % (что соответствует энергии импульса до 1 мДж при диаметре пятна 45 мкм), на поверхностях алюминия АМГ-3 можно сформировать абляционные кратеры размером от 25 до 87 мкм (рис. 3), а на поверхностях стали от 20 до 91 мкм (рис. 4).

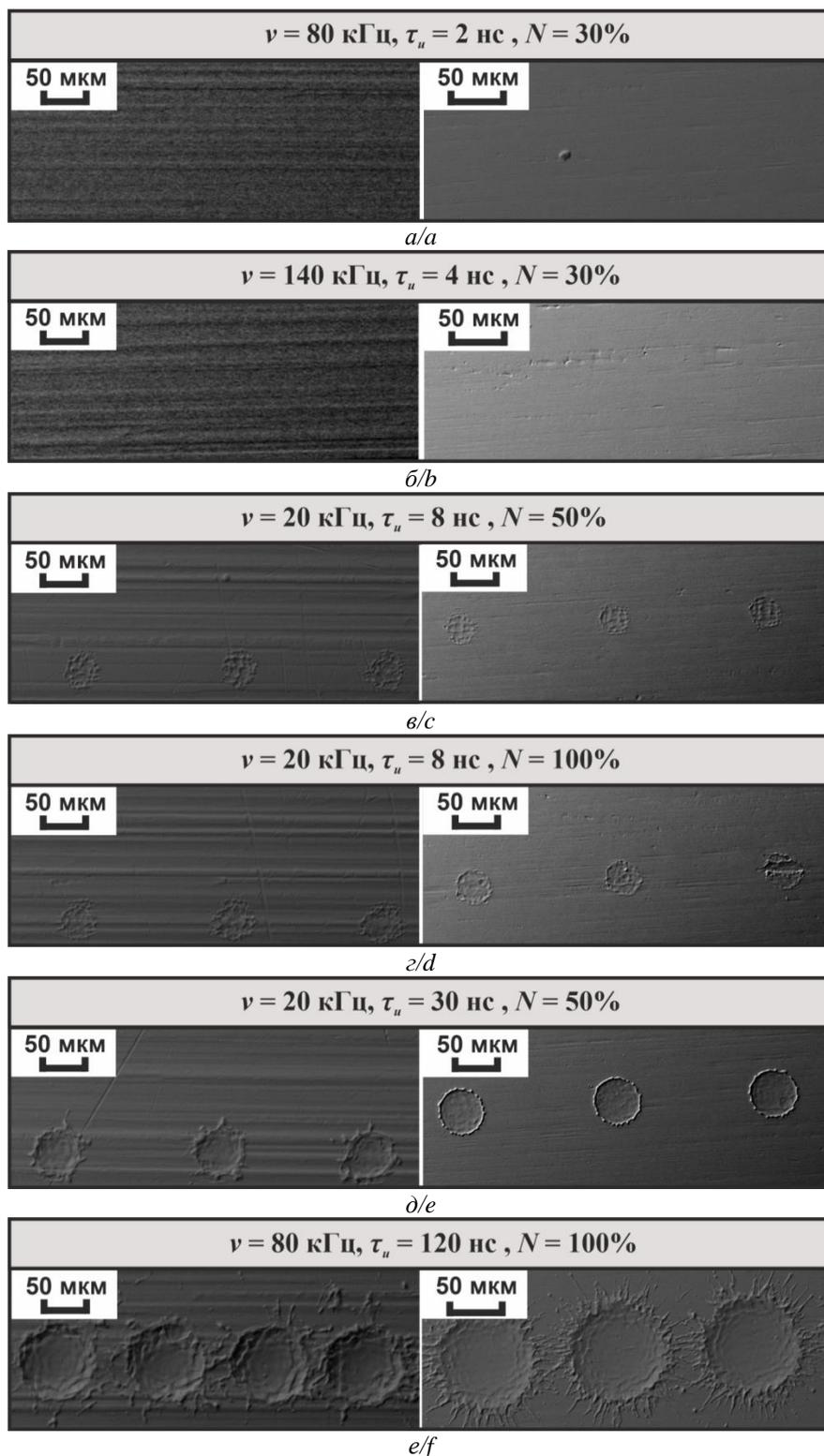


Рис. 2. Типичные СЭМ-изображения элементов текстуры, сформированных воздействием одиночного лазерного импульса на поверхность алюминия (левое изображение) и нержавеющей стали (правое изображение). Режимы воздействия: нагрев без модификации поверхности (а); умеренное плавление (б); интенсивное плавление (в); формирование абляционных кратеров, характеризующихся волнообразной формой периметра (кромки) (г); формирование абляционных кратеров с кромкой правильной формы окружности (д); формирование абляционных кратеров с кромкой, деформированной каплями и струйками расплавленного металла (е)

Fig. 2. Typical SEM-images of the texture elements formed due to a single laser pulse on aluminum (left images) and steel (right images) surfaces. Exposure modes: heating mode without surface modification (a); melting (b); intense melting (c); formation of ablation craters characterized by a wavy shape of the perimeter (edge) (d); formation of ablation craters with a regularly shaped edge (e); formation of ablation craters with an edge deformed by drops and streams of molten metal (e)

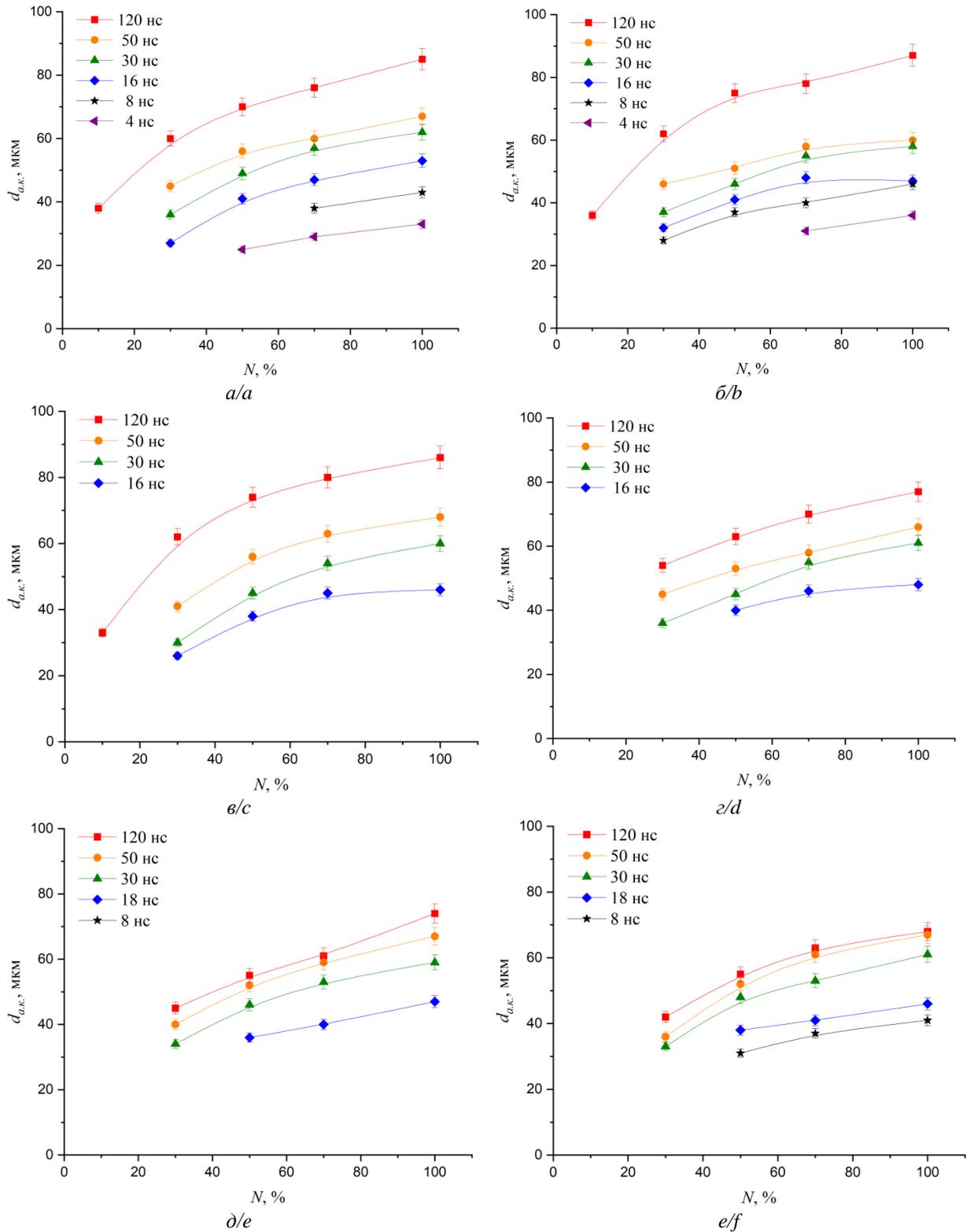


Рис. 3. Зависимости диаметра абляционного кратера от выходной мощности, длительности и частоты импульса в условиях воздействия одиночного лазерного импульса на поверхность алюминия. Частота импульсов, кГц: 2 (а); 20 (б); 50 (в); 80 (г); 110 (д); 140 (е)

Fig. 3. Dependences of the ablation crater diameter on the output power, duration, and frequency of the pulse under the action of a single laser pulse on aluminum surface. Pulse frequency, kHz: 2 (a); 20 (b); 50 (c); 80 (d); 110 (e); 140 (f)

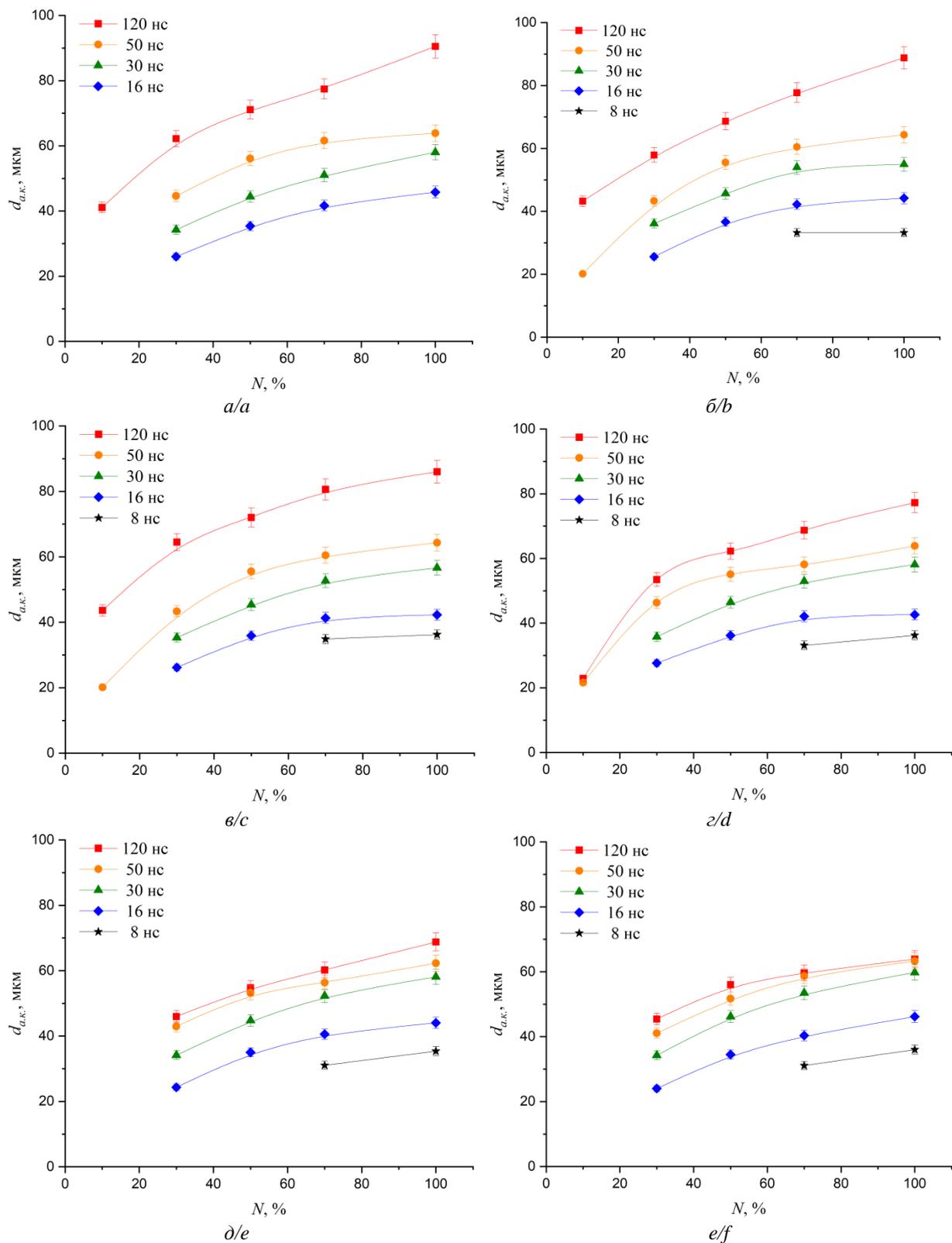


Рис. 4. Зависимости диаметра абляционного кратера от выходной мощности, длительности и частоты импульса в условиях воздействия одиночного лазерного импульса на поверхность нержавеющей стали. Частота импульсов, кГц: 2 (а); 20 (б); 50 (в); 80 (г); 110 (д); 140 (е)

Fig. 4. Dependences of the ablation crater diameter on the output power, duration, and frequency of the pulse under the action of a single laser pulse on steel surface. Pulse frequency, kHz: 2 (a); 20 (b); 50 (c); 80 (d); 110 (e); 140 (f)

Согласно проведённому анализу отдельных элементов текстуры (абляционных кратеров) (рис. 3, 4)

для создания четырех видов текстур (1 – общие точки границ абляционных кратеров (далее по тексту «со-

прикосновение абляционных кратеров» [39]); 2 – микроканалы; 3 – микростолбики; 4 – развитая многомодальная разноуровневая шероховатость (далее по тексту «цветная капуста» [40]) с заданными геометрическими характеристиками и шероховатостью выбрана следующие параметры лазерного излучения:

- 1) для поверхности алюминия: $N=50$ Вт, что соответствует 100 % выходной мощности; $\tau_u=50$ нс; $\nu=2$ кГц; энергия в импульсе $E_u=0,24$ мДж; плотность энергии $E_{pu}=15,16$ Дж/см²;
- 2) для поверхности нержавеющей стали: $N=50$ Вт, что соответствует 100 % выходной мощности; $\tau_u=120$ нс; $\nu=2$ кГц; энергия в импульсе $E_u=0,60$ мДж; плотность энергии равна $E_{pu}=37,68$ Дж/см².

При таких характеристиках лазерного излучения диаметр абляционного кратера на поверхности алюминия составляет 66 мкм, на поверхности нержавеющей стали – 89 мкм.

В табл. 2 приведены значения скорости линейного перемещения луча лазера (ϑ) и число линий прохода

луча лазера на 1 мм (n) для каждого вида созданных текстур, определенных как:

$$\vartheta = r \cdot d_{a.k} \cdot \nu, \text{ мм/с,}$$

где r – относительное расстояние между центрами абляционных кратеров, используемое при расчете скорости линейного перемещения луча лазера ($r=l/d_{a.k}$); l – расстояние между центрами абляционных кратеров, мкм; $d_{a.k}$ – диаметр абляционного кратера, мкм; ν – частота лазера, кГц;

$$n = \frac{1}{r_m \cdot d_{a.k}}, \text{ 1/мм,}$$

где r_m – относительное расстояние между центрами абляционных кратеров, используемое при расчете числа линий прохода луча лазера ($r=l/d_{a.k}$).

На рис. 5, 6 приведены СЭМ-изображения полированных поверхностей алюминия и нержавеющей стали, а также текстур, сформированных лазерным излучением.

Таблица 2. Значения скорости линейного перемещения луча лазера и числа линий прохода луча лазера

Table 2. Linear movement speed of the laser beam and the number of passage lines of the laser beam

Вид текстуры Texture type	Алюминий/Aluminum			Нержавеющая сталь/Stainless steel		
	ϑ , мм/с/mm/s	n , 1/мм/1/mm	r/r_m	ϑ , мм/с/mm/s	n , 1/мм/1/mm	r/r_m
Полированная Polished	–	–	–	–	–	–
Соприкосновение абляционных кратеров Interference of ablation craters	132	15,2	1/1	178	11,2	1/1
Микроканалы Microchannels	13,2	15,2	0,1/1	17,8	11,2	0,1/1
Микростолбики Microcolumns	13,2	7,6	0,1/2	17,8	5,6	0,1/2
«Цветная капуста» «Cauliflower»	13,2	151,5	0,1/0,1	17,8	112,4	0,1/0,1

Установлено, что после механической обработки абразивными материалами на полированной поверхности алюминия (рис. 5, а) и нержавеющей стали (рис. 6, а) формируется текстура, состоящая из произвольно расположенных микроканалов.

Из рис. 5, 6 видно, что в результате лазерной обработки поверхностей металлов сформировались все четыре вида прогнозируемых текстур с заданными геометрическими размерами. На поверхностях с текстурой в виде соприкасающихся кратеров (с общими точками границ абляционных кратеров) диаметры абляционных кратеров 66 мкм (рис. 5, б) и 89 мкм (рис. 6, б) равны заданным аналогичным характеристикам, принятым по зависимостям $d_{a.k}=f(N, \tau_u, \nu)$ для алюминия (рис. 3, а) и для нержавеющей стали (рис. 4, а). Текстура в виде микроканалов (рис. 5, в; рис. 6, в) сформировалась при наложении абляционных кратеров вдоль движения луча лазера. Расстояние между осями микроканалов соответствует заданному размеру, равному диаметру абляционных кратеров (рис. 5, в; рис. 6, в). При этом в точках общих границ микроканалов сформировался валик (рис. 5, в; рис. 6, в). Поверхности металлов модифицировались лазерным лучом с гауссовым распределением энергии. Очевидно, что в центре луча плотность энергии выше, чем на его периферии, где кондуктивный теплоотвод

в окружающую среду влияет на градиент температуры. Поэтому процессы плавления и абляции металла в области центра лазерного пятна (соответствует оси микроканала) происходят интенсивнее, чем на его периферии. Валик между микроканалами формировался в результате более интенсивного плавления и абляции материала по центру лазерного пятна, а также в результате действия ударной волны [41], инициированной лазерным лучом. Аналогичный эффект зарегистрирован на поверхностях с текстурой в виде микростолбиков, сформированных в результате поочередного прохода луча лазера по осям, расположенным перпендикулярно друг к другу (рис. 5, г; рис. 6, г). Как и в случае с текстурой в виде микроканалов, на поверхностях с микростолбиками микроканалы сформировались по направлению движения луча. Как и ожидалось в условиях 90 %-го наложения абляционных кратеров в поперечном и продольном направлениях по ходу луча лазера сформировалась развитая многомодальная, разноуровневая шероховатость в виде «цветной капусты» (рис. 5, д; рис. 6, д).

По результатам анализа сформированных текстур методами конфокальной и электронной микроскопии определены трехмерные параметры шероховатости (табл. 3).

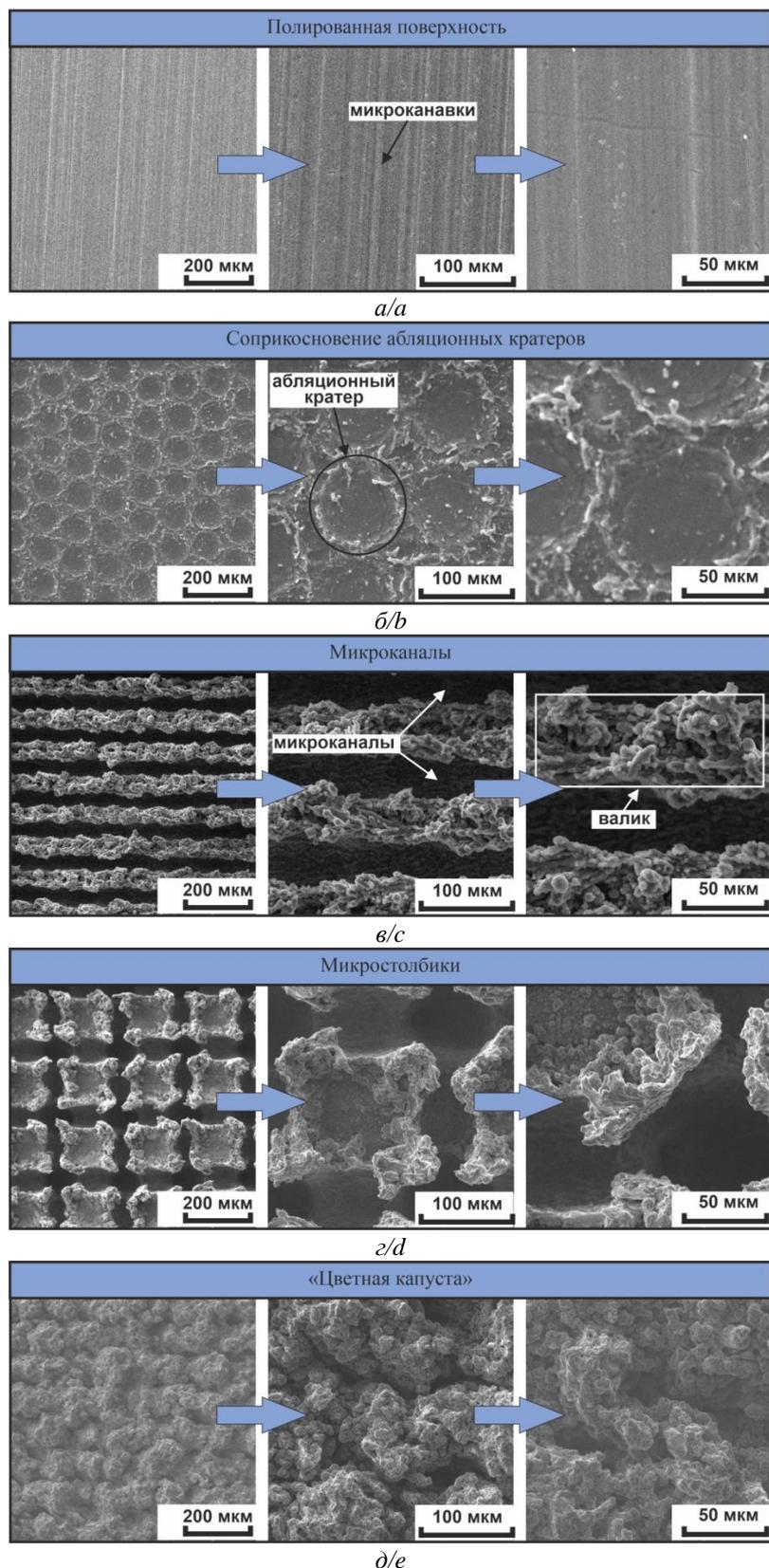


Рис. 5. СЭМ-изображения поверхностей алюминия: полированная поверхность (а); общие точки границ абляционных кратеров (соприкосновение абляционных кратеров) (б); микроканалы (в); микростолбики (г); «цветная капуста» (д). Увеличение изображений слева направо: низкое, среднее и высокое

Fig. 5. SEM-images of aluminum surfaces: polished surface (a); common points of the boundaries of ablation craters (interference of ablation craters) (b); microchannels (c); microcolumns (d); «cauliflower» (e). Magnification of images from left to right: low, medium and high

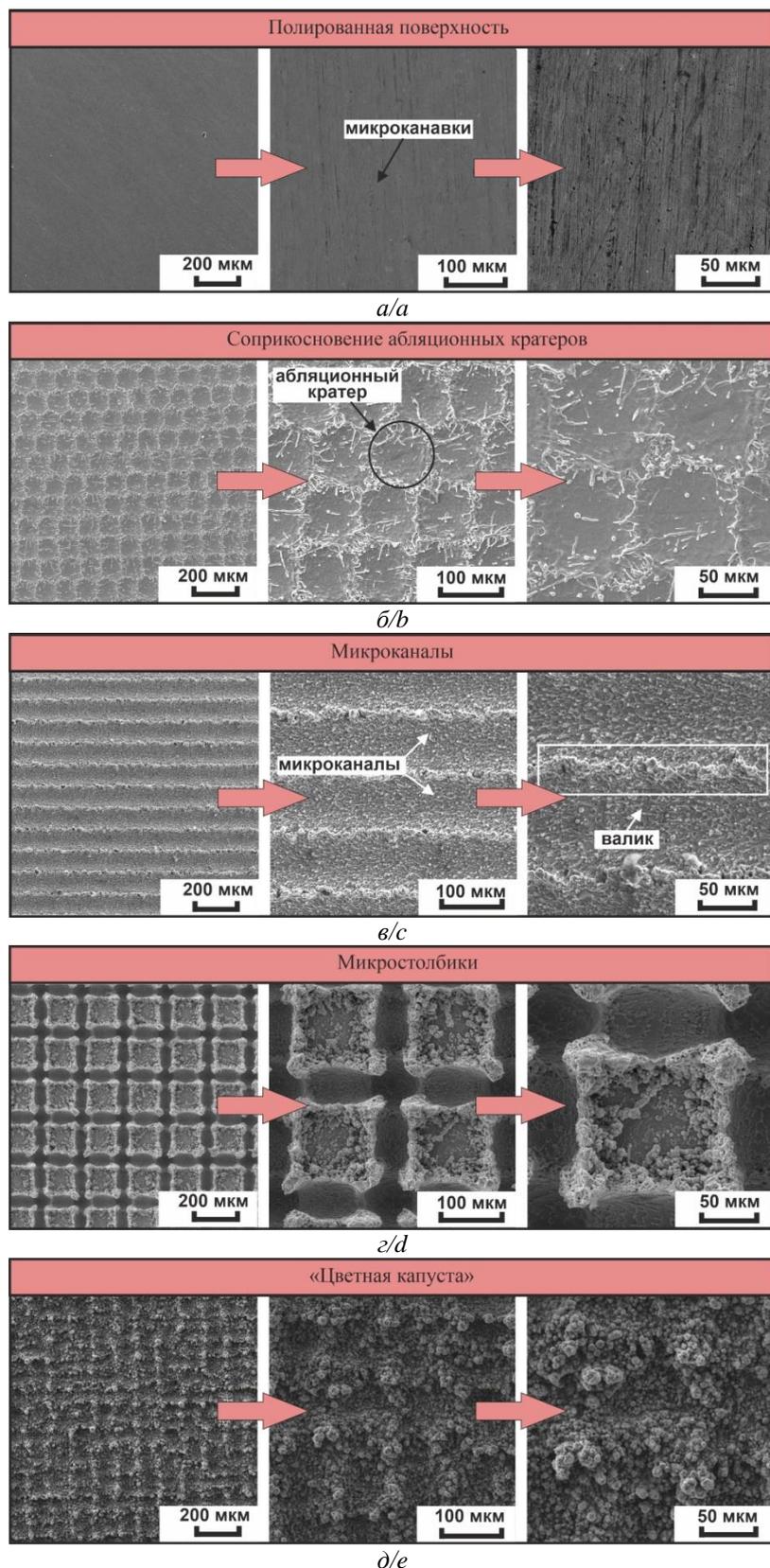


Рис. 6. СЭМ-изображения поверхностей нержавеющей стали: полированная поверхность (а); общие точки границ абляционных кратеров (соприкосновение абляционных кратеров) (б); микроканалы (в); микростолбики (г); «цветная капуста» (д). Увеличение изображений слева направо: низкое, среднее и высокое

Fig. 6. SEM-images of stainless-steel surfaces: polished surface (a); common points of the boundaries of ablation craters (interference of ablation craters) (b); microchannels (c); microcolumns (d); «cauliflower» (e). Magnification of images from left to right: low, medium and high

Таблица 3. Значения трехмерных параметров шероховатости

Table 3. Three-dimensional roughness parameters

Вид текстуры Texture type	Алюминий/Aluminum					Нержавеющая сталь/Stainless steel				
	Sa	Sz	Sdr, %	Sku	Spd·10 ⁵ , 1/мм ² 1/mm ²	Sa	Sz	Sdr, %	Sku	Spd·10 ⁵ , 1/мм ² 1/mm ²
	мкм/μm					мкм/μm				
Полированная/Polished	0,31	0,8	0,7	5,53	1,44	0,11	0,4	0,3	4,65	1,22
Соприкосновение абляционных кратеров Interference of ablation craters	3,37	17,0	5,3	5,33	7,89	1,43	7,0	3,2	4,56	4,22
Микроканалы/Microchannels	24,03	190,0	106,6	3,69	8,69	9,76	53,0	45,9	3,44	5,11
Микростолбики/Microcolumns	15,88	125,0	48,9	3,37	8,85	7,12	32,0	20,2	3,10	5,58
«Цветная капуста»/«Cauliflower»	6,09	53,0	12,7	2,70	12,47	2,78	31,0	6,4	2,85	7,31

Из табл. 3 видно, что из сформированных текстур текстура в виде микростолбиков характеризуется наиболее развитой средней шероховатостью (характеристика Sa), а также наибольшей высотой неровностей (разницей между выступами и углублениями по оценке параметра Sz). Как следствие, текстура в виде микростолбиков характеризуется наибольшим значением прироста площади поверхности за счет шероховатости (характеристика Sdr). Также из табл. 3 видно, что по анализу аналогичных параметров шероховатости сформированные текстуры можно расположить по уменьшению развитости шероховатости в последовательности: микростолбики – микроканалы – «цветная капуста» – соприкосновение абляционных кратеров – полированная.

Параметр Sku используется для оценки степени «плосковершинности» выступов. При значениях $Sku \approx 3$ формируются выступы с симметричной гауссовой формой, плосковершинные выступы характеризуются $Sku < 3$, а островершинные $Sku > 3$. Из табл. 3 видно, что сформированные текстуры можно расположить по уменьшению островершинности в следующей последовательности: полированная соприкосновение абляционных кратеров – микростолбики – микроканалы – «цветная капуста».

Параметр Spd характеризует плотность выступов на единице площади. По увеличению значений этого параметра сформированные текстуры можно расположить в последовательности: полированная – соприкосновение абляционных кратеров – микростолбики – микроканалы – «цветная капуста».

По результатам анализа контактных углов установлено, что полированные поверхности алюминия и нержавеющей стали характеризуются гидрофильными свойствами с контактными углами $86,3 \pm 1,6^\circ$ и $80,0 \pm 2,0^\circ$, соответственно. Как и ожидалось, после модификации лазерным излучением поверхности с текстурами в виде микростолбиков, микроканалов и «цветной капусты» характеризуются супергидрофильностью (капля растекается в тонкую пленку). Причины и механизм инверсии свойств смачиваемости (от гидрофильности к супергидрофильности) поверхностей металлов после их лазерной модификации в настоящее время достаточно хорошо изучены [42]. На поверхностях с текстурами в виде соприкасающихся абляционных кратеров также зарегистрировано улучшение свойств смачивания. Контактный угол на поверхности алюминия уменьшился до $5,0 \pm 1,0^\circ$, на поверхности нержавеющей стали – до $8,3 \pm 1,0^\circ$.

Механизм инверсии свойств смачивания на поверхностях с аналогичной текстурой в виде соприкасающихся абляционных кратеров, сформированных лазерным излучением, изучен в [43]. Так как поверхности с текстурами в виде микроканалов, микростолбиков и «цветной капусты» характеризуются аналогичными супергидрофильными свойствами, основной вклад, влияющий на различие между значениями температур Лейденфроста на поверхностях металла одинакового элементного состава, оказывает шероховатость. Стоит отметить, что поверхности с текстурой в виде соприкасающихся кратеров близки по свойствам смачиваемости к супергидрофильным поверхностям. По этой причине можно сопоставить вклад влияния шероховатости (характеристик текстуры) данных поверхностей на смещение температуры Лейденфроста с поверхностями, демонстрирующими супергидрофильные свойства.

На рис. 7 приведены экспериментально установленные значения температур Лейденфроста (t , °C) на поверхностях алюминия и нержавеющей стали. Из рис. 7 видно, что путем модификации теплопередающих поверхностей нагрева типичных конструкционных металлов (алюминия и нержавеющей стали) лазерным излучением наносекундной длительности можно осуществить смещение кризиса теплообмена (эффекта Лейденфроста) в область более высоких температур. Из рассматриваемых конфигураций текстур в виде соприкасающихся кратеров (с общими точками границ), микроканалов, микростолбиков и «цветной капусты» наибольшее смещение температуры возникновения кризиса теплообмена (точки Лейденфроста) в область больших температур зарегистрировано на поверхности с текстурой в виде «цветной капусты». Для поверхности алюминия увеличение температуры составило 119°C , для поверхности нержавеющей стали – 47°C . Очевидно, что рост температуры возникновения эффекта Лейденфроста обусловлен улучшением свойств смачиваемости и формированием развитой шероховатости. Большой прирост температуры на поверхностях алюминия по сравнению с нержавеющей сталью с одинаковым видом текстуры обусловлен тем, что на поверхности алюминия сформировалась более развитая шероховатость. Оценка последней проведена на основании анализа параметров шероховатости (табл. 3).

На рис. 8 приведены зависимости температуры Лейденфроста на поверхностях алюминия и нержавеющей стали от трехмерных параметров шероховатости.

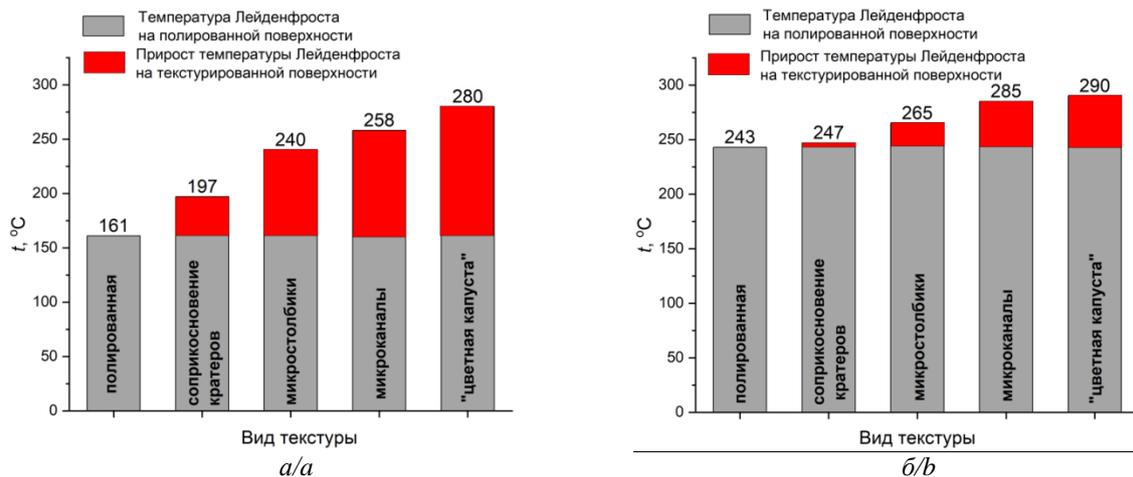


Рис. 7. Температура Лейденфроста. Поверхности: алюминия (а); нержавеющей стали (б)

Fig. 7. Leidenfrost temperature on aluminum (a); steel (b)

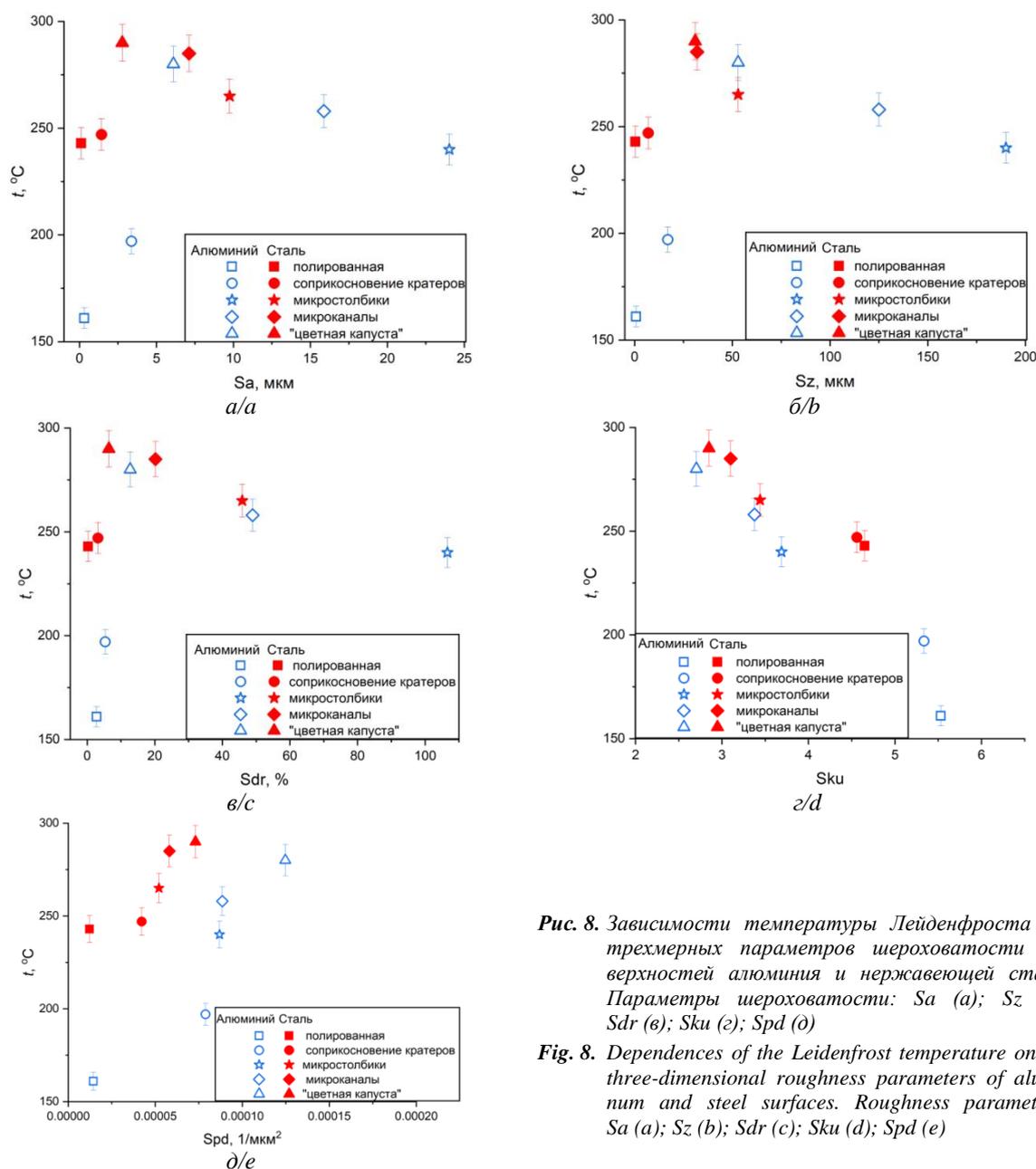


Рис. 8. Зависимости температуры Лейденфроста от трехмерных параметров шероховатости поверхностей алюминия и нержавеющей стали. Параметры шероховатости: Sa (а); Sz (б); Sdr (в); Sku (г); Spd (д)

Fig. 8. Dependences of the Leidenfrost temperature on the three-dimensional roughness parameters of aluminum and steel surfaces. Roughness parameters: Sa (a); Sz (b); Sdr (c); Sku (d); Spd (e)

По результатам анализа рис. 8 установлено, что отсутствует явная связь температуры Лейденфроста со следующими характеристиками текстуры: средней шероховатостью (рис. 8, *a*), высотой между впадинами и вершинами (рис. 8, *b*), а также приростом площади поверхности за счет шероховатости (рис. 8, *в*). Из рис. 8, *г*, *д* видно, что температура Лейденфроста смещается в область более высоких температур при уменьшении островершинности выступов и росте их плотности на единице площади поверхности. Последнее можно объяснить тем, что формированию характерной для эффекта Лейденфроста шарообразной формы капли и стабильной «паровой подушки» между каплей и поверхностью препятствует высокая плотность плосковершинных выступов. Чем выше значение параметра Spd и меньше значение Sku , тем выше вероятность разрушения капли. Но стоит отметить, что не установлено явной численной связи между значениями характеристик Spd и Sku и приростом температуры Лейденфроста на поверхностях алюминия и нержавеющей стали. Так, например, в случае поверхностей алюминия росту значений Spd более чем в 8,5 раза и уменьшению значений Sku более чем в 2 раза (отношение соответствующих параметров полированной поверхности и поверхности с текстурой в виде «цветной капусты» (табл. 3)) соответствует рост температуры Лейденфроста на $\approx 74\%$ (с 161 до 280 °С (рис. 7, *a*)). А в случае поверхностей нержавеющей стали росту значений Spd в 6 раз и уменьшению значений Sku более чем в 1,5 раза (отношение параметров Spd и Sku полированной поверхности и с текстурой в виде «цветной капусты») соответствует рост температуры Лейденфроста на $\approx 19\%$ (с 243 до 290 °С (рис. 7, *b*)). Последнее обусловлено различием в элементном составе поверхностей и, следовательно, теплофизическими свойствами, влияющими на возникновение эффекта Лейденфроста.

По результатам анализа рис. 7, 8 установлено, что лазерный способ обработки поверхностей металлов (алюминия и нержавеющей стали), используемых в качестве конструкционных материалов, например, при изготовлении поверхностей нагрева энергогенерирующих и теплопередающих устройств, является наиболее перспективным по сравнению с механической обработкой абразивными материалами, широко используемыми в настоящее время в машиностроении. Последнее обусловлено тем, что лазерная обработка поверхности металлов позволяет за счет формируемой текстуры в достаточно широких диапазонах значений управлять температурой Лейденфроста более чем на 110 °С на поверхности алюминия и более чем на 45 °С на поверхности нержавеющей стали. Для смещения температуры Лейденфроста в область более высоких температур необходимо создавать развинутую многоуровневую шероховатость, характеризующуюся большим значением параметра Spd (характеризует число выступов на единицу площади поверхности) и параметром Sku (эксцесс) значением менее 3. Из исследованных видов текстур: полированная, соприкосновение абляционных кратеров, микростолбики, микроканалы, «цветная капуста»,

наилучшие результаты достигнуты на текстуре в виде «цветной капусты».

Заключение

1. По результатам проведенных экспериментов условно выделено шесть возможных режимов воздействия одиночного лазерного импульса наносекундной длительности с энергией в импульсе до 1 мДж на поверхность нержавеющей стали и алюминия: 1) режим нагрева без модификации поверхности; 2) умеренное плавление; 3) интенсивное плавление; 4) формирование абляционных кратеров, характеризующихся волнообразной формой периметра (кромки); 5) формирование абляционных кратеров с кромкой правильной формы окружности; 6) формирование абляционных кратеров с кромкой, деформированной каплями и струйками расплавленного металла.
2. Экспериментально показана возможность применимости графоаналитической методики [34], разработанной для прогнозирования текстур на поверхностях керамики, базирующейся на знании геометрической формы и размеров элемента текстуры (абляционного кратера), для создания заданных микротекстур на поверхностях алюминия и нержавеющей стали в виде абляционных кратеров, микроканалов, микростолбиков и «цветной капусты».
3. Экспериментально установлено, что отсутствует явная связь температуры Лейденфроста со следующими характеристиками текстуры: средней шероховатостью, высотой между впадинами и вершинами, а также приростом площади поверхности за счет шероховатости. Также установлено, что температура Лейденфроста смещается в область более высоких температур при уменьшении островершинности выступов и росте их плотности на единице площади поверхности.
4. Экспериментально доказано, что лазерный способ обработки поверхностей металлов (алюминия и нержавеющей стали), используемых в качестве конструкционных материалов, например, при изготовлении поверхностей нагрева энергогенерирующих и теплопередающих устройств, является наиболее перспективным по сравнению с механической обработкой абразивными материалами, широко используемыми в настоящее время в машиностроении. Последнее обусловлено тем, что лазерная обработка поверхности металлов позволяет за счет формируемой текстуры и создания экстремальных свойств смачивания (супергидрофильности) в достаточно широких диапазонах значений управлять характеристиками кризиса кипения 2 рода, а именно температурой Лейденфроста более чем на 110 °С на поверхности алюминия и более чем на 45 °С на поверхности нержавеющей стали. Зарегистрированные сдвиги температур Лейденфроста характерны для исследования кризиса кипения в атмосферных условиях с использованием дистиллированной деаэрированной воды в качестве теплоносителя на сформиро-

ванных лазерным излучением текстурах в условиях энергии в импульсе до 0,6 мДж. Для смещения температуры Лейденфроста в область более высоких температур необходимо создавать развитую многоуровневую шероховатость, характеризующуюся большим значением параметра Spd (характеризует число выступов на единицу площади поверхности) и параметром Sku (эксцесс) значением менее 3. Различия в величине сдвига температуры Лейденфроста на разных металлах (алюминий, нержавеющая сталь) обусловлены главным образом формируемой текстурой и шероховатостью. Влияние свойств смазывания можно исключить, поскольку после лазерной обработки алюминия и нержавеющей стали их поверхности характеризуются подобными свойствами (супергидрофильностью/гидрофильностью). По результатам анализа параметров шероховатости на поверхностях алюминия сформирована более развитая шероховатость по сравнению с поверхностями

стали. По этим причинам сдвиг температуры Лейденфроста на поверхностях алюминия превышает аналогичную характеристику на поверхностях нержавеющей стали.

Полученные результаты могут быть использованы при решении актуальных проблем теплофизики, направленных на повышение энергоэффективности систем охлаждения энергонасыщенного оборудования путем создания конструкционных материалов (металлов и их сплавов) с целевыми функциональными свойствами модификацией поверхностей лазерным излучением наносекундной длительности. Примерами энергонасыщенного оборудования являются устройства связи пятого поколения 5G, атомные реакторы, микропроцессоры суперкомпьютеров и устройства авиа- и космических аппаратов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00417, <https://rscf.ru/project/23-29-00417>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bittner B., Kissel T. Ultrasonic atomization for spray drying: a versatile technique for the preparation of protein loaded biodegradable microspheres // *Journal of Microencapsulation*. – 1992. – V. 16. – Iss. 3. – P. 325–341.
2. Xin Huang L., Filková I.M.A. Industrial spray drying systems. *Handbook of Industrial Drying*. – Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. – 1312 p.
3. Chakraborty S., Rosen M.A., MacDonald B.D. Analysis and feasibility of an evaporative cooling system with diffusion-based sessile droplet evaporation for cooling microprocessors // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – V. 125. – P. 104–110.
4. Wachters L.H.J., Westerling N.A.J. The heat transfer from a hot wall to impinging mist droplets in the spheroidal state // *Chemical Engineering Science*. – 1966. – V. 21. – Iss. 12. – P. 1231–1238.
5. Evaporation of droplets of surfactant solutions / S. Semenov, A. Trybala, H. Agogo, N. Kovalchuk, F. Ortega, R.G. Rubio, V.M. Starov, M.G. Velarde // *Langmuir*. – 2013. – V. 29. – Iss. 32. – P. 10028–10036.
6. Simultaneous spreading and evaporation: Recent developments / S. Semenov, A. Trybala, R.G. Rubio, N. Kovalchuk, V. Starov, M.G. Velarde // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2014. – V. 206. – P. 382–398.
7. Ponomarev K., Orlova E., Feoktistov D. Effect of the heat flux density on the evaporation rate of a distilled water drop // *EPJ Web of Conferences*. – 2016. – V. 110. – P. 7–10.
8. Duisburg G.O. *De aquae communis nonnullis qualitatibus tractatus*. – Oxford: Oxford University, 1756. – 175 p.
9. Walker J. Boiling and the Leidenfrost effect // *Physics Education*. – 1994. – V. 10. – P. 1–4.
10. The effect of ceramic surface structure modification method on the ignition and combustion behavior of non-metallized and metallized gel fuel particles exposed to conductive heating / D.V. Feoktistov, D.O. Glushkov, A.G. Nigay, D.S. Nikitin, E.G. Orlova, I.I. Shanenkov // *Fuel*. – 2022. – V. 330. – P. 125576.
11. Dynamic Leidenfrost effect: relevant time and length scales / M. Shirota, M.A.J. Van Limbeek, C. Sun, A. Prosperetti, D. Lohse // *American Physical Society*. – 2016. – V. 116. – Iss. 6. – P. 064501.
12. Ajaev V.S., Kabov O.A. Levitation and self-organization of droplets // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2021. – V. 53. – Iss. 14. – P. 203–225.
13. Leidenfrost effect: accurate drop shape modeling and refined scaling laws / B. Sobac, A. Rednikov, S. Dorbolo, P. Colinet // *American Physical Society*. – 2014. – V. 90. – Iss. 5. – P. 053011.
14. Xu X., Qian T. Hydrodynamics of Leidenfrost droplets in one-component fluids // *American Physical Society*. – 2013. – V. 87. – Iss. 4. – P. 043013.
15. Rossky P.J. Exploring nanoscale hydrophobic hydration // *Faraday Discussions*. – 2010. – V. 146. – P. 13–18.
16. Experimental and numerical studies of evaporation of a sessile water drop on a heated conductive substrate / O.A. Kabov, E.Y. Gatapova, A.A. Semenov, M. Jutley, V.V. Ajaev, E.O. Kirichenko, D.V. Feoktistov, G.V. Kuznetsov, D.V. Zaitsev // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. – 2018. – V. 6. – Iss. 4. – P. 421–435.
17. Nagai N., Nishio S. Leidenfrost temperature on an extremely smooth surface // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 1996. – V. 12. – Iss. 3. – P. 373–379.
18. On the effect of surface roughness height, wettability, and nanoporosity on leidenfrost phenomena / H. Kim, B. Truong, J. Buongiorno, L.H. Hu // *Applied Physics Letters*. – 2011. – V. 98. – Iss. 8. – P. 083121.
19. Hughes F. The evaporation of drops from super-heated nano-engineered surfaces. *Doc. Diss.* – Massachusetts, 2009. – 49 p.
20. Stabilization of Leidenfrost vapour layer by textured superhydrophobic surfaces / I.U. Vakarelski, N.A. Patankar, J.O. Marston, D.Y.C. Chan, S.T. Thoroddsen // *Nature*. – 2012. – V. 489. – P. 274–277.
21. Evaporation of water drop on a plasma-irradiated hydrophilic surface / Y. Takata, S. Hidaka, A. Yamashita, H. Yamamoto // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2004. – V. 25. – Iss. 2. – P. 320–328.
22. Munoz R., Beving D., Yan Y. Hydrophilic zeolite coatings for improved heat transfer: a quantitative analysis // *AIChE Journal*. – 2005. – V. 44. – Iss. 3. – P. 4310–4315.
23. Huang C.K., Carey V.P. The effects of dissolved salt on the Leidenfrost transition // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2007. – V. 50. – Iss. 1–2. – P. 269–282.
24. Ignition and combustion characteristics of coal-water-oil slurry placed on modified metal surface at mixed heat transfer / D.V. Feoktistov, D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, D.S. Nikitin, E.G. Orlova, K.K. Paushkina // *Fuel Processing Technology*. – 2022. – V. 233. – P. 107291.
25. Ignition and combustion enhancement of composite fuel in conditions of droplets dispersion during conductive heating on steel surfaces with different roughness parameters / D.V. Feoktistov, D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, E.G. Orlova, K.K. Paushkina // *Fuel*. – 2022. – V. 314. – P. 122745.
26. Gel fuels based on oil-filled cryogels: corrosion of tank material and spontaneous ignition / D.V. Feoktistov, D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, E.G. Orlova // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – V. 421. – P. 127765.
27. Laser-assisted processing of aluminum alloy for the fabrication of superhydrophobic coatings withstanding multiple degradation factors / N.E. Sataeva, L.B. Boinovich, K.A. Emelyanenko, A.G. Domantovsky, A.M. Emelyanenko // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – V. 397. – P. 125993.
28. Extraordinary shifts of the Leidenfrost temperature from multiscale micro/nanostructured surfaces / C. Kruse, T. Anderson,

- C. Wilson, C. Zuhlke, D. Alexander, G. Gogos, S. Ndao // *Langmuir*. – 2013. – V. 29. – P. 9798–9806.
29. Leidenfrost point reduction on micropatterned metallic surfaces / D. Arnaldo Del Cerro, Á.G. Marín, G.R.B.E. Römer, B. Pathiraj, D. Lohse, A.J. Huis in 't Veld // *Langmuir*. – 2012. – V. 28. – Iss. 42. – P. 15106–15110.
30. Effects of droplet diameter on the Leidenfrost temperature of laser processed multiscale structured surfaces / A. Hassebrook, C. Kruse, C. Wilson, T. Anderson, C. Zuhlke, D. Alexander, G. Gogos, S. Ndao // 14th IEEE IThERM Conference. – Orlando, Florida, USA, 2014. – P. 452–457.
31. Leidenfrost drops on micro/nanostructured surfaces / V. Talari, P. Behar, Y. Lu, E. Haryadi, D. Liu // *Frontiers in Energy*. – 2018. – V. 12. – Iss. 1. – P. 22–42.
32. Effects of droplet diameter and fluid properties on the Leidenfrost temperature of polished and micro/nanostructured surfaces / A. Hassebrook, C. Kruse, C. Wilson, T. Anderson, C. Zuhlke, D. Alexander, G. Gogos, S. Ndao // *Journal of Heat Transfer*. – 2016. – V. 138. – Iss. 5. – P. 1–7.
33. Romashevskiy S.A., Ovchinnikov A.V. Functional surfaces with enhanced heat transfer for spray cooling technology // *High Temperature*. – 2018. – V. 56. – Iss. 2. – P. 255–262.
34. Expanding the scope of SiC ceramics through its surface modification by different methods / D.V. Feoktistov, G.V. Kuznetsov, A.A. Sivkov, A.S. Ivashutenko, D.S. Nikitin, I.I. Shanenkov, A.M. Abdelmagid, E.G. Orlova // *Surface and Coatings Technology*. – 2022. – V. 435. – P. 128263.
35. Feoktistov D.V., Orlova E.G., Islamova A.G. Spreading behavior of a distilled water droplet on a superhydrophobic surface // *MATEC Web of Conferences*. – 2015. – V. 23. – P. 01054.
36. Wavelength-dependent measurement and evaluation of surface topographies: application of a new concept of window roughness and surface transfer function / M. Wieland, P. Hänggi, W. Hotz, M. Textor, B.A. Keller, N.D. Spencer // *Wear*. – 2000. – V. 237. – Iss. 2. – P. 231–252.
37. Wettability and surface roughness analysis of laser surface texturing of AISI 430 stainless steel / E.R. Moldovan, C.C. Doria, J.L. Ocaña, L.S. Baltes, E.M. Stanciu, C. Croitoru, A. Pascu, I.C. Roata, M.H. Tiorean // *Materials*. – 2022. – V. 15. – Iss. 8. – P. 2955.
38. Климков Ю.М., Майоров В.С., Хорошев М.В. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. – М.: МИИГАиК, 2014. – 108 с.
39. Wettability of metal surfaces affected by paint layer covering / S. Pogorzelski, K. Boniewicz-Szmyt, M. Grzegorzczak, P. Rochowski // *Materials*. – 2022. – V. 15. – Iss. 5. – P. 1830.
40. Nanoscaled fractal superstructures via laser patterning – a versatile route to metallic hierarchical porous materials / H. Reinhardt, M. Kroll, S.L. Karstens, S. Schlabach, N.A. Hampp, U. Tallarek // *Advanced Materials Interfaces*. – 2021. – V. 8. – Iss. 4. – P. 2000253.
41. Генерация ударных волн при взаимодействии мощного лазерного излучения с поликристаллическими мишенями / И.Н. Бурдонский, А.Ю. Гольцов, А.Г. Леонов, К.Н. Макаров, И.С. Тимофеев, В.Н. Юфа // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. – 2013. – Т. 36. – № 2. – С. 8–18.
42. Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. Laser obtained superhydrophobic state for stainless steel corrosion protection, a review // *Coatings*. – 2023. – V. 13. – Iss. 1. – P. 194.
43. Time dependency of the hydrophilicity and hydrophobicity of metallic alloys subjected to femtosecond laser irradiations / P. Bizi-Bandoki, S. Valette, E. Audouard, S. Benayoun // *Applied Surface Science*. – 2013. – V. 273. – Iss. 1. – P. 399–407.

Поступила: 24.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 01.03.2023 г.

Информация об авторах

Феоктистов Д.В., кандидат технических наук, доцент Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кузнецов Г.В., доктор физико-математических наук, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Абедтазехабди А., аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Орлова Е.Г., кандидат физико-математических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Бондарчук С.П., аспирант Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Дорожкин А.В., магистрант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 536.4

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF COOLING SYSTEMS FOR ENERGY-SATURATED EQUIPMENT BY SHIFTING THE SECOND KIND HEAT TRANSFER CRISIS TO THE HIGHER TEMPERATURE REGION

Dmitry V. Feoktistov¹,
fdv@tpu.ru

Geniy V. Kuznetsov¹,
kuznetsovvg@tpu.ru

Akram Abedtazehabadi¹,
abedtazehabadi@tpu.ru

Evgeniya G. Orlova¹,
lafleur@tpu.ru

Stepan P. Bondarchuk¹,
spb7@tpu.ru

Alexander V. Dorozhkin¹,
avd46@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. The development of fundamentally new strategies and technical solutions leading to an increase in energy efficiency and resource saving of cooling systems for energy-saturated equipment is impossible without the creation of new structural materials with targeted functional properties. Promising cooling systems of heat-loaded equipment, for example, 5G communication devices emitting high-density heat fluxes (up to 1000 W/cm²), include systems based on drip irrigation. Such cooling makes it possible to increase the intensity and uniformity of heat removal, and significantly reduce the coolant consumption. However, the results obtained so far show that the use of traditional approaches (the use of surfaces made of steel, copper, aluminum and their alloys, processed by grinding or polishing) does not allow solving the problem of intensive cooling of surfaces that release high-density heat fluxes. Laser strategies for processing heat transfer surfaces are one of the most effective ways to intensify evaporation and boiling. In relation to the development of laser systems in the last decade, financially sound technologies for creating targeted, functional surface properties of metals have become available. The practical use of laser-modified heat-transfer surfaces of cooling systems can solve a number of problems associated with meeting the growing global demand for energy resources, in particular, when intensifying the removal of high-density heat fluxes from elements of energy-saturated equipment by shifting the heat transfer crisis of the 2nd kind to higher temperatures.

The purpose is to assess the possibility of shifting the heat transfer crisis (Leidenfrost effect) to higher temperatures by modifying heat transfer heating surfaces with nanosecond laser radiation.

Methods. Using nanosecond laser processing, unique textures with specified geometric characteristics were created on typical materials used in practice in the design of heat transfer surfaces for heating cooling systems. Texture characteristics were determined using confocal and electron microscopy equipment. The Leidenfrost effect was recorded using a specially made setup with equipment for the shadow optical method and high-speed video recording of fast physical processes.

Results. The modes of a single nanosecond laser pulse action on the stainless steel and aluminum surfaces were detected. These modes guarantee the formation of an ablation crater. We showed the possibility to apply the graphic-analytical technique for the formation of a given microtexture during the treatment of metal surfaces with nanosecond laser radiation. Laser treatment of metal surfaces with pulse energy up to 0,6 mJ makes it possible to control the boiling crisis characteristics (2nd kind), in particular, the Leidenfrost temperature, over a wide range of values by more than 110 °C on aluminum surface and by more than 45 °C on stainless steel surface in atmospheric conditions when using distilled deaerated water as a heat carrier due to the formed texture and superhydrophilic properties.

Key words:

Heat transfer crisis, drop, surface, texture, roughness, laser texturing.

This work was supported by the Russian Science Foundation, grant number 23-29-00417, <https://rscf.ru/project/23-29-00417>.

REFERENCES

- Bittner B., Kissel T. Ultrasonic atomization for spray drying: a versatile technique for the preparation of protein loaded biodegradable microspheres. *Journal of Microencapsulation*, 1992, vol. 16, no. 3, pp. 325–341.
- Xin Huang L., Filková I.M.A. *Industrial spray drying systems. Handbook of industrial drying*. Boca Raton, Taylor & Francis, 2006. 1312 p.
- Chakraborty S., Rosen M.A., MacDonald B.D. Analysis and feasibility of an evaporative cooling system with diffusion-based sessile droplet evaporation for cooling microprocessors. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 125, pp. 104–110.
- Wachters L.H.J., Westerling N.A.J. The heat transfer from a hot wall to impinging mist droplets in the spheroidal state. *Chemical Engineering Science*, 1966, vol. 21, no. 12, pp. 1231–1238.
- Semenov S., Trybala A., Agogo H., Kovalchuk N., Ortega F., Rubio R.G., Starov V.M., Velarde M.G. Evaporation of droplets of surfactant solutions. *Langmuir*, 2013, vol. 29, no. 32, pp. 10028–10036.
- Semenov S., Trybala A., Rubio R.G., Kovalchuk N., Starov V., Velarde M.G. Simultaneous spreading and evaporation: Recent developments. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2014, vol. 206, pp. 382–398.
- Ponomarev K., Orlova E., Feoktistov D. Effect of the heat flux density on the evaporation rate of a distilled water drop. *EPJ Web of Conferences*, 2016, vol. 110, pp. 7–10.
- Duisburg G.O. *De aquae communis nonnullis qualitatibus tractatus* [A treatise on some qualities of common water]. Oxford, Oxford University, 1756. 175 p.
- Walker J. Boiling and the Leidenfrost effect. *Physics Education*, 1994, vol. 10, pp. 1–4.
- Feoktistov D.V., Glushkov D.O., Nigay A.G., Nikitin D.S., Orlova E.G., Shanenkov I.I. The effect of ceramic surface structure modification method on the ignition and combustion behavior of non-metallized and metallized gel fuel particles exposed to conductive heating. *Fuel*, 2022, vol. 330, p. 125576.
- Shirota M., Van Limbeek M.A.J., Sun C., Prosperetti A., Lohse D. Dynamic Leidenfrost effect: relevant time and length scales. *American Physical Society*, 2016, vol. 116, no. 6, p. 064501.
- Ajaev V.S., Kabov O.A. Levitation and self-organization of droplets. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2021, vol. 53, no. 14, pp. 203–225.

13. Sobac B., Rednikov A., Dorbolo S., Colinet P. Leidenfrost effect: accurate drop shape modeling and refined scaling laws. *American Physical Society*, 2014, vol. 90, no. 5, p. 053011.
14. Xu X., Qian T. Hydrodynamics of Leidenfrost droplets in one-component fluids. *American Physical Society*, 2013, vol. 87, no. 4, p. 043013.
15. Rossky P.J. Exploring nanoscale hydrophobic hydration. *Faraday Discussions*, 2010, vol. 146, pp. 13–18.
16. Kabov O.A., Gatapova E.Y., Semenov A.A., Jutley M., Ajaev V.V., Kirichenko E.O., Feoktistov D.V., Kuznetsov G.V., Zaitsev D.V. Experimental and numerical studies of evaporation of a sessile water drop on a heated conductive substrate. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 421–435.
17. Nagai N., Nishio S. Leidenfrost temperature on an extremely smooth surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1996, vol. 12, no. 3, pp. 373–379.
18. Kim H., Truong B., Buongiorno J., Hu L.H. On the effect of surface roughness height, wettability, and nanoporosity on leidenfrost phenomena. *Applied Physics Letters*, 2011, vol. 98, no. 8, p. 083121.
19. Hughes F. *The evaporation of drops from super-heated nano-engineered surfaces*. Doc. Diss. Massachusetts, 2009. 49 p.
20. Vakarelski I.U., Patankar N.A., Marston J.O., Chan D.Y.C., Thoroddsen S.T. Stabilization of Leidenfrost vapour layer by textured superhydrophobic surfaces. *Nature*, 2012, vol. 489, pp. 274–277.
21. Takata Y., Hidaka S., Yamashita A., Yamamoto H. Evaporation of water drop on a plasma-irradiated hydrophilic surface. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2004, vol. 25, no. 2, pp. 320–328.
22. Munoz R., Beving D., Yan Y. Hydrophilic zeolite coatings for improved heat transfer: a quantitative analysis. *AIChE Journal*, 2005, vol. 44, no. 3, pp. 4310–4315.
23. Huang C.K., Carey V.P. The effects of dissolved salt on the Leidenfrost transition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, vol. 50, no. 1–2, pp. 269–282.
24. Feoktistov D.V., Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Nikitin D.S., Orlova E.G., Paushkina K.K. Ignition and combustion characteristics of coal-water-oil slurry placed on modified metal surface at mixed heat transfer. *Fuel Processing Technology*, 2022, vol. 233, p. 107291.
25. Feoktistov D.V., Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Orlova E.G., Paushkina K.K. Ignition and combustion enhancement of composite fuel in conditions of droplets dispersion during conductive heating on steel surfaces with different roughness parameters. *Fuel*, 2022, vol. 314, p. 122745.
26. Feoktistov D.V., Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Orlova E.G. Gel fuels based on oil-filled cryogels: Corrosion of tank material and spontaneous ignition. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 421, p. 127765.
27. Sataeva N.E., Boinovich L.B., Emelyanenko K.A., Domantovsky A.G., Emelyanenko A.M. Laser-assisted processing of aluminum alloy for the fabrication of superhydrophobic coatings withstanding multiple degradation factors. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 397, p. 125993.
28. Kruse C., Anderson T., Wilson C., Zuhlke C., Alexander D., Gogos G., Ndao S. Extraordinary shifts of the Leidenfrost temperature from multiscale micro/nanostructured surfaces. *Langmuir*, 2013, vol. 29, pp. 9798–9806.
29. Arnaldo Del Cerro D., Marín Á.G., Römer G.R.B.E., Pathiraj B., Lohse D., Huis in 't Veld A.J. Leidenfrost point reduction on micropatterned metallic surfaces. *Langmuir*, 2012, vol. 28, no. 42, pp. 15106–15110.
30. Hassebrook A., Kruse C., Wilson C., Anderson T., Zuhlke C., Alexander D., Gogos G., Ndao S. Effects of droplet diameter on the Leidenfrost temperature of laser processed multiscale structured surfaces. *14th IEEE ITherm Conference*. Orlando, Florida, USA, 2014. pp. 452–457.
31. Talari V., Behar P., Lu Y., Haryadi E., Liu D. Leidenfrost drops on micro/nanostructured surfaces. *Frontiers in Energy*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 22–42.
32. Hassebrook A., Kruse C., Wilson C., Anderson T., Zuhlke C., Alexander D., Gogos G., Ndao S. Effects of droplet diameter and fluid properties on the Leidenfrost temperature of polished and micro/nanostructured surfaces. *Journal of Heat Transfer*, 2016, vol. 138, no. 5, pp. 1–7.
33. Romashevskiy S.A., Ovchinnikov A.V. Functional surfaces with enhanced heat transfer for spray cooling technology. *High Temperature*, 2018, vol. 56, no. 2, pp. 255–262.
34. Feoktistov D.V., Kuznetsov G.V., Sivkov A.A., Ivashutenko A.S., Nikitin D.S., Shanenkov I.I., Abdelmagid A.M., Orlova E.G. Expanding the scope of SiC ceramics through its surface modification by different methods. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 435, p. 128263.
35. Feoktistov D.V., Orlova E.G., Islamova A.G. Spreading behavior of a distilled water droplet on a superhydrophobic surface. *MATEC Web of Conferences*, 2015, vol. 23, p. 01054.
36. Wieland M., Hänggi P., Hotz W., Textor M., Keller B.A., Spencer N.D. Wavelength-dependent measurement and evaluation of surface topographies: application of a new concept of window roughness and surface transfer function. *Wear*, 2000, vol. 237, no. 2, pp. 231–252.
37. Moldovan E.R., Doria C.C., Ocaña J.L., Baltés L.S., Stanciu E.M., Croitoru C., Pascu A., Roata I.C., Tiorean M.H. Wettability and surface roughness analysis of laser surface texturing of AISI 430 stainless steel. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 8, p. 2955.
38. Klimkov Yu.M., Mayorov V.S., Khoroshev M.V. *Vzaimodeystvie lazernogo izlucheniya s veshchestvom* [Interaction of laser radiation with matter]. Moscow, MIIGAiK Publ., 2014. 108 p.
39. Pogorzelski S., Boniewicz-Szmyt K., Grzegorzczak M., Rochowski P. Wettability of metal surfaces affected by paint layer covering. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 5, p. 1830.
40. Reinhardt H., Kroll M., Karstens S.L., Schlabach S., Hampf N.A., Tallarek U. Nanoscaled fractal superstructures via laser patterning – a versatile route to metallic hierarchical porous materials. *Advanced Materials Interfaces*, 2021, vol. 8, no. 4, p. 2000253.
41. Burdonsky I.N., Golsov A.Yu., Leonov A.G., Makarov K.N., Timofeev I.S., Yufa V.N. Shock wave generation in the high-power laser interaction with polycrystalline targets. *Problems of Atomic Science and Technology, Series: Thermonuclear Fusion*, 2013, vol. 36, no. 2, pp. 8–18. In Rus.
42. Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. Laser obtained superhydrophobic state for stainless steel corrosion protection, a review. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 1, p. 194.
43. Bizi-Bandoki P., Valette S., Audouard E., Benayoun S. Time dependency of the hydrophilicity and hydrophobicity of metallic alloys subjected to femtosecond laser irradiations. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 273, pp. 399–407.

Received: 24 February 2023.

Reviewed: 1 March 2023.

Information about the authors

Dmitry V. Feoktistov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Geniy V. Kuznetsov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Akram Abedtazehabadi, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Evgeniya G. Orlova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Stepan P. Bondarchuk, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University

Alexander V. Dorozhkin, master degree student, National Research Tomsk Polytechnic University.