

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Института
теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской
академии наук,
доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН



Д. М. Маркович

«21» ноября 2019 г.

Отзыв

Ведущей организации

на диссертационную работу **Орловой Евгении Георгиевны**
«Смачивание и растекание капель жидкости по текстурированным лазерным
излучением поверхностям алюминиево-магниевого сплава», представленной
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Управление процессами растекания малых объемов жидкости и смачиванием поверхностей металлов и сплавов имеет важное **практическое значение** в различных областях техники и технологии. Например, использование самоочищающихся материалов с гидрофобными и супергидрофобными свойствами **актуально** в нетрадиционной энергетике, авиационной и космической отрасли при решении проблемы обледенения частей ветряных турбин и летательных аппаратов. При окраске поверхностей в строительстве важным свойством является их гидрофильность. В микрофлюидике изменение свойств приповерхностного слоя материала может быть использовано для управления поверхностными эффектами при растекании жидкости микролитровых объемов в устройствах с характерными геометрическими размерами не более десятка миллиметров. В системах обеспечения требуемого теплового режима оборудования необходима модификация технологических поверхностей для реализации капельной конденсации, эффективность которой намного выше пленочной.

Управлять смачиванием и растеканием жидкости можно изменяя состояние поверхности материала, вдоль которой движется жидкая среда, в частности, изменяя химический состав приповерхностного слоя (нанесение слоя гидрофобного агента) либо топографию поверхности. Одним из перспективных направлений в области создания новых технологий обработки материалов является модификация их поверхностей концентрированными потоками энергии, в частности, лазерным излучением. Происходящие в

результате такой обработки физико-химические превращения кардинально изменяют функциональные свойства металлов и сплавов, в частности изменяется смачивание. Сформированная же текстура в совокупности с изменяющимися свойствами смачиваемости позволяет контролировать процесс растекания жидкости по таким поверхностям. Однако для установления возможности управления гидродинамическими процессами за счет создания текстуры лазерным излучением необходимо проведение комплексных экспериментальных исследований. Поэтому **целью** диссертационной работы Орловой Е.Г. являлось обоснование по результатам экспериментальных исследований возможности управления смачиванием и растеканием малых объемов жидкости по текстурированным лазерным излучением поверхностям алюминиево-магниевого сплава.

Диссертационная работа Орловой Е.Г. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Работа содержит 166 страниц, включая 12 таблиц и 58 рисунков.

Во введении показаны актуальность и степень разработанности темы исследования, поставлены цель и задачи, приведены методы исследования, обоснована достоверность полученных результатов, представлены научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, указаны сведения об апробации и публикациях автора.

В первой главе представлен обзор известных исследований, посвященных процессам растекания малых объемов жидкостей по гладким и шероховатым поверхностям, а также изменению свойств смачиваемости поверхностей металлов и сплавов после их модификации лазерным излучением. Проведен анализ известных моделей для описания процесса растекания жидкости. По результатам проведенного анализа современного состояния исследуемой области автором сделан вывод об отсутствии экспериментальных данных, подтверждающих возможность управления растеканием жидкости за счет формирования текстуры на поверхностях металлов и сплавов лазерным излучением.

Вторая глава посвящена описанию материалов и методов исследования. Описаны процедуры изготовления образцов алюминиево-магниевого сплава и формирования текстуры наносекундным лазерным излучением. Также представлены методы исследования полученных текстур с использованием сканирующего электронного микроскопа и профилометрического комплекса. Приведена схема экспериментальной установки для исследования смачивания и растекания жидкости по поверхностям, обработанным лазерным излучением. Обоснован выбор метода обработки теневых изображений капель.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований смачивания поверхностей алюминиево-магниевого сплава после лазерной обработки, для сравнения использовалась немодифицированная полированная поверхность сплава. На основе предложенной процедуры унификации текстур, сформированных лазерным

излучением, выделены две группы: анизотропная и упорядоченная текстуры. Методами энергодисперсионной и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии проведен анализ изменения элементного состава приповерхностного слоя образцов, обработанных лазерным излучением. Зарегистрировано неравномерное содержание кислорода в приповерхностном слое образцов с упорядоченной текстурой. Показано как изменяется смачиваемость образцов алюминиево-магниевого сплава с разной текстурой после обработки. Установлено, что время стабилизации свойств смачивания образцов после лазерного текстурирования зависит от периода сформированной текстуры и глубины отдельного элемента в форме кратера. В условиях стабилизации свойств смачиваемости упорядоченные текстуры характеризовались статическими контактными углами в диапазоне от $74,0^\circ$ до $100,2^\circ$. Анизотропная текстура проявляла гидрофобные свойства с углом 131° .

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования динамических характеристик процесса растекания малых объемов жидкости по текстурированным поверхностям сплава. Автором разработан подход к определению гистерезиса контактного угла на поверхностях, текстура которых образована отдельными элементами в форме кратеров, отличающийся от известного возможностью определения гистерезиса в условиях флуктуационных движений линии трехфазного контакта в направлении натекания и оттекания малых объемов жидкости при числах капиллярности, стремящихся к нулю. Установлено влияние сформированной текстуры на диаметры растекания, времена пиннинга, скорости перемещения линии трехфазного контакта. Экспериментально зарегистрированы режимы смачивания поверхностей: гомогенный – на упорядоченной текстуре, гетерогенный – на анизотропной. Проанализировано изменение гистерезиса контактного угла во времени после текстурирования поверхностей. Установлено, что максимальные значения гистерезиса соответствуют условиям наибольшей анизотропии смачивания по поверхности. Известные модели (молекулярно-кинетическая и гидродинамическая) применены для описания процесса растекания капли по текстурированным лазерным излучением поверхностям сплава АМГ6.

В заключении подведены основные итоги диссертационного исследования.

Общая методология и методика исследования

Методики исследования, применяемые в диссертации, включают в себя совокупность экспериментальных подходов к изучению процессов растекания малых объемов жидкости по текстурированным поверхностям. Автор диссертации использовала группу самых современных методик экспериментального исследования и современные высокоточные средства регистрации. При постановке, планировании, проведении экспериментов и обработке результатов автор использовала современные представления о процессе растекания капель жидкости по поверхностям металлов и сплавов. При обработке результатов экспериментов большое внимание автор уделила оценке достоверности экспериментальных данных. Выполнена оценка

систематических и случайных погрешностей результатов измерений. После анализа и обобщения установленных при проведении экспериментальных исследований основных закономерностей исследовавшихся в диссертации сложных гидродинамических процессов Е.Г. Орлова сформулировала группу моделей и гипотез о механизмах смачивания и растекания малых объемов жидкости по текстурированным лазерным излучением поверхностям. Можно отметить, что все выводы и заключения автора диссертации соответствуют современным представлениям о физике процессов смачивания и растекания капель жидкости.

Среди полученных Орловой Е.Г. **новых результатов** следует выделить следующие:

- Установлено, что изменением периода текстуры, сформированной лазерным излучением, можно контролировать свойства смачиваемости поверхностей алюминиево-магниевого сплава от супергидрофильности (характеризующейся статическим контактным углом, равным 0°) до гидрофобности ($132,0^\circ$).
- Разработан новый подход к определению гистерезиса контактного угла на поверхностях, текстура которых образована отдельными элементами в форме кратеров, отличающийся от известного возможностью определения гистерезиса в условиях флуктуационных движений линии трехфазного контакта в направлении натекания и оттекания малых объемов жидкости при числах капиллярности, стремящихся к нулю.
- Гистерезис контактного угла на упорядоченной текстуре зависит от анизотропии свойств смачиваемости по поверхности и изменяется во времени. Максимальные значения гистерезисов (от $11,9^\circ$ до $43,0^\circ$ в зависимости от расхода жидкости и периода текстуры) соответствуют условиям наибольшей анизотропии свойств смачиваемости.
- После обработки лазерным излучением гистерезис контактного угла на поверхности с анизотропной текстурой уменьшается и в условиях стабилизации свойств смачиваемости становится равным $8,6^\circ$, что меньше величины, определенной на полированной поверхности ($13,0^\circ$). Последнее связано с влиянием гетерогенного режима смачивания поверхности с анизотропной текстурой.
- Экспериментально зарегистрированный переход из гетерогенного (частичное проникновение жидкости в углубления рельефа и локальные «воздушные подушки») к гомогенному (полное заполнение углублений жидкостью) режиму смачивания поверхностей алюминиево-магниевого сплава с анизотропной текстурой сопровождается незначительным уменьшением статического контактного угла (с $131,0^\circ$ до $129,0^\circ$), диаметра (с $2,12$ мм до $2,08$ мм) и высоты (с $2,2$ мм до $2,0$ мм) капли.
- Установлена возможность применения классической молекулярно-кинетической модели к описанию гидродинамических процессов в условиях растекания малых объемов жидкости по поверхностям алюминиево-магниевого сплава с упорядоченной (в форме кратеров) и

анизотропной текстурами, сформированными наносекундным лазерным излучением, в области малых чисел капиллярности от 10^{-10} до 10^{-5} .

Диссертационная работа Орловой Е.Г. вносит достойный вклад в решение задачи управления смачиванием и растеканием капель жидкости на поверхностях металлов за счет создания текстуры, имеющей значение для развития механики жидкости, газа и плазмы в области исследования возможности управления различными гидродинамическими процессами.

Теоретическая значимость. На основе полученных диссертантом экспериментальных результатов установлены закономерности изменения смачиваемости и процесса растекания жидкости на обработанных лазерным излучением поверхностях алюминивно-магниевого сплава, расширяющие и уточняющие знания о поведении жидкости при малых скоростях движения на текстурированных поверхностях металлов и сплавов.

Практическая значимость заключается в возможности использования полученных результатов при проектировании мини- и микроканальных систем капельного охлаждения, микрофлюидных устройств.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Полученные результаты могут применяться в исследованиях, проводимых в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Институте теплофизики СО РАН, Пермском государственном национальном исследовательском университете, Пермском национальном исследовательском политехническом университете, Национальном исследовательском Томском государственном университете, Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Институте теоретической и прикладной механики СО РАН, Удмуртском федеральном исследовательском центре УрО РАН, а также в других организациях РФ и за рубежом.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации. В нем раскрыты цель и задачи исследования, представлены основные результаты исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Основные результаты опубликованы в 23 работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных результатов диссертаций (Теплофизика и Аэромеханика, Инженерно-физический журнал, European Journal of Mechanics/B-Fluids, Applied Surface Science), 1 статье в зарубежном научном журнале (Journal of Colloid and Interface Science), входящем в базу данных Scopus (опубликована онлайн), 7 статьях в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в базы данных Web of Science и / или Scopus (MATEC Web of Conferences, EPJ Web of Conferences, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering) и 11 публикациях в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций.

По работе имеется несколько замечаний:

1. Во второй главе, посвященной описанию материалов, оборудования и методов исследования, отсутствует исчерпывающая информация о качестве используемой в экспериментах воды. Автор указывает только то, что вода дистиллированная. Ничего не сказано о содержании в воде растворенных газов, которые могут значительно влиять на режимы смачивания исследуемых поверхностей.
2. В работе не объясняется почему выбран именно данный тип текстурирования поверхности (каверны круглой формы). Как изменятся результаты, если каверны будут другой формы?
3. Известны несколько методов измерения гистерезиса контактного угла, в частности метод колебательного увеличения и уменьшения объема при подаче/откачивании жидкости дозатором, игла которого находится в капле. В диссертации отсутствует пояснение по выбранному методу (дозирование через отверстие в подложке). Будут ли отличаться динамические характеристики процесса растекания жидкости при дозировании сверху?
4. В работе проводилась верификация используемой методики определения краевого угла для краевых углов больше 15° , но на некоторых графиках представлены значения краевых углов от 0 до 15° . Известно, что теневой метод определения краевого угла (с использованием нетелецентрической оптики) для малых краевых углов имеет значительную погрешность. Поэтому представленные в работе данные по краевым углам в диапазоне от 0 до 15° не могут считаться достоверными.
5. В работе полученные экспериментальные данные сравниваются с тремя моделями. Но нет исчерпывающего объяснения, почему данные лучше всего соответствуют молекулярно-кинетической модели Блэйка.

Несмотря на указанные замечания, следует отметить, что в диссертации получены новые результаты, представленные выше. **Достоверность и обоснованность** результатов подтверждена оценкой систематических и случайных погрешностей, сравнением полученных данных с известными теоретическими следствиями и экспериментальными результатами других авторов.

Заключение

Диссертация Орловой Евгении Георгиевны «Смачивание и растекание капель жидкости по текстурированным лазерным излучением поверхностям алюминиево-магниевого сплава» соответствует отрасли «физико-математические науки», а содержательная часть и полученные результаты соответствуют специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы по области исследования «Экспериментальные методы исследования динамических процессов в жидкостях» (п. 17 паспорта специальности).

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу и полностью соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении

ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в ред. от 01.10.2018), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Орлова Евгения Георгиевна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв рассмотрен и утвержден на семинаре лаборатории интенсификации процессов теплообмена Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, протокол № 1 от 21 ноября 2019 г.

Заведующий лабораторией
интенсификации процессов теплообмена
доктор физико-математических наук
(01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника),
профессор

Кабов Олег Александрович

Старший научный сотрудник
лаборатории интенсификации процессов теплообмена
кандидат физико-математических наук
(01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника)

Зайцев Дмитрий Валерьевич

21 ноября 2019 г.

Подписи О.А. Кабова и Д.В. Зайцева удостоверяю



Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук
Адрес: 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1
Телефон/факс: +7 (383) 330-90-40
Сайт: <http://www.itp.nsc.ru/>
E-mail: director@itp.nsc.ru