

На правах рукописи



Орлова Евгения Георгиевна

**СМАЧИВАНИЕ И РАСТЕКАНИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ
ПО ТЕКСТУРИРОВАННЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ
ПОВЕРХНОСТЯМ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВА**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Кузнецов Гений Владимирович

Официальные оппоненты:

Демин Виталий Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», кафедра теоретической физики, заведующий кафедрой

Марчук Игорь Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», механико-математический факультет, декан

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 20 декабря 2019 года в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 36 (корпус № 10 (НИИ ПММ), аудитория 239).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/OrlovaEG20122019.html>

Автореферат разослан « ____ » октября 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Пикушак
Елизавета Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Течения жидкостей в каналах технических устройств и при реализации технологических процессов сопровождаются соответствующим взаимодействием жидкости с поверхностью этих каналов. Шероховатость обтекаемой поверхности играет достаточно значимую роль при любых скоростях движения, характерных для течений каплевидных жидкостей. Но особое влияние рельеф поверхности канала оказывает при малых скоростях движения жидкой среды, когда силы поверхностного трения сопоставимы с силами инерции. Такого рода течения достаточно типичны и реализуются в системах охлаждения энергонасыщенного оборудования, химических и нефтехимических технологиях, в системах и устройствах медико-биологического назначения. До последнего времени при математическом моделировании (на разном уровне) таких процессов взаимодействие жидкости с поверхностью описывается коэффициентом поверхностного трения. Но тенденции быстрого развития техники и технологий иллюстрируют необходимость более глубокого изучения процессов взаимодействия жидкости с поверхностью в связи с тем, что, изменяя рельеф поверхности, параллельно которой движется жидкая среда, можно управлять такими течениями, интенсифицируя или замедляя протекание процессов теплопереноса, массообмена, химического реагирования и др. При этом важную роль играет фактор смачивания поверхности. Управляя смачиванием, также можно управлять течением жидкости в каналах. Наибольшим потенциалом управления, скорее всего, обладают течения при малых скоростях движения жидкости, которые в технологиях охлаждения поверхностей каплями, пленками или ривулетами принято называть растеканием жидкости.

Управлять процессами смачивания и растекания можно изменяя состояние поверхности, по которой движется жидкость. Последнее реализуется двумя способами: химическим (нанесением покрытий) или созданием шероховатости. Первый (например, нанесение гидрофобизатора) часто неэффективен по причине истирания и уноса слоя. При реализации второго поверхность подвергается обработке с целью формирования специальной текстуры. Лазерная обработка – перспективный способ нанесения текстуры: бесконтактный; не требующий значительных капиталовложений; позволяющий получить широкий диапазон текстур на различных материалах, как с гидрофобными, так и с гидрофильными свойствами. Актуальным является использование лазерной обработки с целью изменения свойств смачиваемости поверхностей металлов и сплавов от супергидрофильности до супергидрофобности и придания им новых уникальных свойств.

Однако пока нет экспериментальных данных, подтверждающих возможность управления смачиванием и растеканием жидкости за счет нанесения текстуры на металлические поверхности различных технологических устройств лазерным излучением. Для разработки

технологии текстурирования поверхностей микрофлюидных устройств, мини- и микроканальных систем охлаждения необходимы зависимости динамических характеристик процесса растекания жидкости по таким поверхностям от свойств последних.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в теорию растекания капель жидкости внесли результаты исследований P. G. De Gennes, L. H. Tanner, R. Hoffman, Г. Р. Шрагера, В. А. Якутенка, В. А. Архипова, О. А. Кабова, В. С. Ажаева, С. Н. Резника, А. Л. Ярина. Модели растекания малых объемов жидкости по поверхностям твердого тела (молекулярно-кинетическая (Т. D. Blake) гидродинамическая (О. В. Воинов, R. G Cox) комбинированная (J. G. Petrov, P. G. Petrov)) разработаны еще в 90-х годах XX века. В настоящее время область применения таких моделей на практике для достоверного прогноза закономерностей и характеристик процесса растекания малых объемов жидкости по твердым телам, поверхность которых текстурирована инновационным способом – лазерным излучением, ставшим широко доступным лишь в последнее десятилетие, весьма ограничена.

Из анализа информации в международных периодических изданиях следует, что после обработки лазерным излучением поверхностей металлов (меди, алюминия, нержавеющей стали и их сплавов) происходит инверсия смачивания (от супергидрофильности до супер / гидрофобности). Но пока не изучено влияние расхода жидкости, текстуры, образованной лазерным излучением, инверсии смачивания на динамические характеристики процесса растекания капель по поверхностям металлов и сплавов, текстурированным лазерным излучением. Не установлены параметры лазерного излучения для получения текстур на поверхностях металлов и сплавов, обеспечивающих управление смачиванием и растеканием жидкости.

Целью работы является обоснование по результатам экспериментальных исследований возможности управления смачиванием и растеканием малых объемов жидкости по текстурированным лазерным излучением поверхностям алюминиево-магниевого сплава.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определить параметры импульсной наносекундной лазерной обработки, обеспечивающие получение новых типов гидрофобных и гидрофильных поверхностей алюминиево-магниевого сплава, на которых возможно управлять смачиванием и растеканием малых объемов жидкости.
2. Выявить связи между свойствами смачиваемости, их изменением во времени после обработки лазерным излучением и текстурой поверхности алюминиево-магниевого сплава.
3. Разработать подход к определению гистерезиса контактного угла на поверхностях типичного конструкционного материала – алюминиево-магниевого сплава после формирования текстуры наносекундным лазерным излучением.

4. Установить механизм движения капли жидкости по поверхностям алюминивно-магниевого сплава, текстурированным наносекундным лазерным излучением.

5. Установить влияние текстуры и свойств смачиваемости текстурированных лазерным излучением поверхностей алюминивно-магниевого сплава на динамические характеристики процесса растекания капель жидкости.

6. Определить режим смачивания (гомогенный или гетерогенный) поверхностей алюминивно-магниевого сплава, текстурированных наносекундным лазерным излучением.

7. Установить применимость молекулярно-кинетической, гидродинамической и комбинированной моделей к описанию динамических процессов в условиях растекания капли жидкости по поверхностям алюминивно-магниевого сплава, текстурированным наносекундным лазерным излучением.

Научная новизна работы.

1. Обоснована возможность управления смачиванием и растеканием капель жидкости по поверхностям алюминивно-магниевого сплава за счет формирования текстуры наносекундным лазерным излучением.

2. 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.

3. Установлено влияние текстуры и свойств смачиваемости на динамические характеристики процесса растекания капель жидкости по поверхностям алюминивно-магниевого сплава, характеризующимся различной смачиваемостью (от супергидрофильности до гидрофобности).

4. Установлено, что гистерезис контактного угла зависит от анизотропии свойств смачиваемости поверхностей алюминивно-магниевого сплава с упорядоченной текстурой.

5. Экспериментально зарегистрированы режимы смачивания поверхностей с анизотропной и упорядоченной текстурами, сформированными на алюминивно-магниевом сплаве наносекундным лазерным излучением.

6. Установлена возможность применения молекулярно-кинетической модели Т. Д. Блейка для описания процесса растекания капли жидкости по поверхностям алюминивно-магниевого сплава, текстурированным наносекундным лазерным излучением.

Теоретическая ценность и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы состоит в обосновании возможности управления смачиванием и растеканием малых объемов жидкости за счет текстурирования приповерхностного слоя лазерным излучением.

Полученные результаты и закономерности обеспечивают возможность прогностической оценки изменения свойств смачиваемости текстурированных лазерным излучением поверхностей металлов и сплавов и динамических характеристик процесса растекания капель жидкости.

Экспериментальное обоснование возможности управления смачиванием и растеканием малых объемов жидкости за счет лазерной обработки имеет практическую значимость при разработке технологий модификации поверхностей систем охлаждения энергонасыщенного оборудования различного назначения. Установленные зависимости смачивания от текстуры, элементного состава, времени, влияние этих параметров на динамические характеристики процесса растекания капель могут быть использованы для разработки рекомендаций к нормативным методам расчета систем на базе капельного охлаждения и микрофлюидных устройств.

Диссертационное исследование выполнено в рамках проекта РФФИ № 18-38-00315 мол_а «Исследование свойств смачивания модифицированных металлических подложек и механизма растекания капель на их поверхностях».

Методы исследования. Теневой оптический метод применялся для определения свойств смачиваемости текстурированных образцов. Фото-микроскопия использовалась для регистрации режимов смачивания. Метод «bottom-up» (подача жидкости через отверстие в образце с нижней стороны) применялся для установления закономерностей процесса растекания. Методами гониометрии определялись геометрические параметры капли по изображениям, полученным с использованием оборудования для реализации теневого метода. Наносекундным итербиевым импульсным волоконным лазером на алюминиево-магниевом сплаве формировались текстуры, обеспечивающие получение новых типов гидрофобных и гидрофильных поверхностей. Бесконтактным профилометром и методом электронной микроскопии исследованы рельеф и морфология текстур. Анализ элементного состава выполнен методами энергодисперсионной и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование возможности управления смачиванием от супергидрофильности (характеризующейся статическим контактным углом, равным 0°) до гидрофобности (132°), а также характеристиками процесса растекания (динамическими контактными углами натекания и оттекания, диаметром растекания, скоростью перемещения линии трехфазного контакта) малых объемов жидкости за счет формирования текстуры на поверхностях алюминиево-магниевого сплава наносекундным лазерным излучением;

2. 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;

3. Гистерезис контактного угла, изменяющийся во времени, зависит от анизотропии свойств смачиваемости поверхности алюминиево-магниевого сплава с упорядоченной текстурой, сформированной наносекундным лазерным излучением. Максимальные значения гистерезиса контактного угла (от $11,9^\circ$ до $43,0^\circ$) соответствуют условиям наибольшей анизотропии свойств смачиваемости;

4. Экспериментально зарегистрированный переход из гетерогенного к гомогенному режиму смачивания поверхностей алюминиево-магниевого сплава с анизотропной текстурой сопровождается незначительным уменьшением статического контактного угла (с 131° до 129°), диаметра (с 2,12 мм до 2,08 мм) и высоты (с 2,2 мм до 2,0 мм) капли;

5. Обоснование применимости молекулярно-кинетической модели Т. Д. Блейка к описанию процесса растекания капли жидкости по поверхностям алюминиево-магниевого сплава с упорядоченной и анизотропной текстурами, сформированными наносекундным лазерным излучением, в области малых чисел капиллярности от 10^{-10} до 10^{-5} .

Достоверность полученных результатов достигается корректностью постановки экспериментальных исследований, использованием современного высокоточного оборудования и подтверждается оценкой систематических и случайных погрешностей. Случайные ошибки определялись по результатам проведенных повторно экспериментов в идентичных условиях. Также проводилось сравнение ряда полученных результатов с известными теоретическими следствиями и экспериментальными данными других авторов.

Личный вклад автора состоит в совместной с научным руководителем постановке задач исследования, самостоятельной разработке процедуры формирования текстуры наносекундным лазерным излучением на поверхностях алюминиево-магниевого сплава, методики экспериментальных исследований смачивания и растекания капли жидкости на текстурированных лазерным излучением поверхностях сплава; постановке и планировании экспериментов; проведении опытов; обработке полученных результатов; оценке систематических и случайных погрешностей; анализе и обобщении результатов исследований; формулировке основных защищаемых положений и выводов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на II, III и IV Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2014, 2015, 2016), V и VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2014, 2015), I Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение» (Новосибирск, 2014), Международной молодежной научной школе-семинаре «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического

оборудования» (Томск, 2015, 2016, 2018), XXI Международной научной конференции студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (Томск, 2015), IX Минском Международном семинаре «Тепловые трубы, тепловые насосы, холодильники, источники энергии» (Минск, Беларусь, 2015), 11 Международном Форуме по стратегическим технологиям IFOST-2016 (Новосибирск, 2016), Международном симпозиуме и школе для молодых ученых «Межфазные явления и теплоперенос» (ИРНТ) (Новосибирск, 2016), научно-практической Конференции с международным участием XLV «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 2016), XXI Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2017), 12 Международной конференции «Двухфазные системы для космического и наземного применения» (Новосибирск, 2017), Седьмой Российской Национальной конференции по теплообмену (Москва, 2018)

Публикации. По теме диссертации Е. Г. Орловой опубликовано 23 работы, в том числе 4 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 2 статьи в зарубежных научных журналах, входящих в Web of Science; 2 статьи в российских научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Science), 1 статья в зарубежном научном журнале, входящем в Scopus (опубликована онлайн), 7 статей в сборниках материалов конференций, представленных в зарубежных научных изданиях, входящих в Web of Science и/или Scopus, 11 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 166 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 194 наименования, 3 приложений, содержит 12 таблиц и 58 рисунков (из них 9 рисунков в приложениях).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, проведен анализ степени ее разработанности, сформулированы цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, описаны методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, указана степень достоверности результатов и приведены сведения об апробации работы.

В первой главе представлен анализ известных результатов исследований по смачиванию и растеканию малых объемов жидкости по гладким и шероховатым поверхностям. Установлено, что лазерное текстурирование является наиболее перспективным способом создания текстуры на поверхностях металлов с целью управления смачиванием и растеканием капель жидкости. Выявлено отсутствие нормативных документов по оценке

эффективности влияния текстур на растекание малых объемов жидкости. На сегодняшний день не установлены основные параметры шероховатости, необходимые для описания таких текстур, неизученным остается влияние инверсии свойств смачиваемости поверхностей металлов и текстуры на динамические характеристики процесса растекания капель. По результатам анализа известных исследований установлено, что до сих пор не разработаны модели растекания малых объемов жидкости, учитывающие шероховатость, образованную лазерным излучением.

Во второй главе приведено описание использованных материалов, методов исследования и экспериментального оборудования.

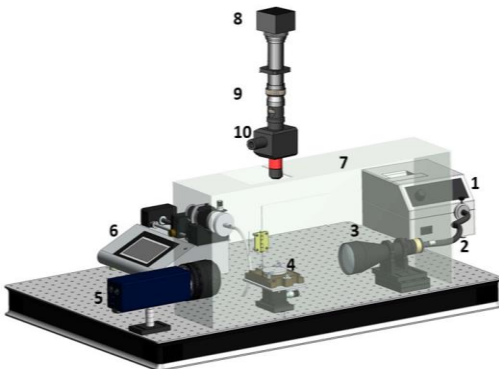


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – источник света; 2 – волоконно-оптический иллюминатор; 3 – телецентрическая труба;
- 4 – подложка; 5 – высокоскоростная видеокамера;
- 6 – шприцевой насос; 7 – прозрачный бокс; 8 – CCD видеокамера; 9 – набор увеличительных колец;
- 10 – делитель пучка

лежащую на поверхности подложки 4. Теневые фотоизображения капли получены с использованием высокоскоростной видеокамеры 5. По полученным изображениям методами гониометрии определялись геометрические размеры капли.

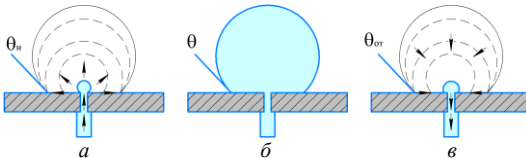


Рисунок 2 – Формирование капли методом «bottom-up»:

- a* – ДКУ натекания; *б* – статический контактный угол;
- в* – ДКУ оттекания

Исследование свойств смачиваемости и процесса растекания капель по поверхностям алюминиево-магниевого сплава, текстурированным лазерным излучением, проводилось на установке, схема которой приведена на рисунке 1. Теневой оптический метод использовался для получения фотоизображений капли. Свет от источника 1 проходил через волоконно-оптический иллюминатор 2 в телецентрическую трубу 3, где преобразовался из рассеянного в плоскопараллельный. Последний освещал каплю,

При исследовании свойств смачиваемости капля дистиллированной воды дозировалась на подложку 4 электронным дозатором. Характеристики процесса растекания получены при формировании капли методом «bottom-up» (рисунок 2).

Высокоточным электронным шприцевым насосом Cole Parmer 6 (рисунок 1) дистиллированная вода подавалась и откачивалась по медной трубке с

внутренним диаметром 1 мм, соединяющей насос и отверстие в подложке 4. При натекании жидкости формировался динамический контактный угол (ДКУ) натекания, при оттекании – ДКУ оттекаания. Режимы смачивания (гомогенный и гетерогенный) регистрировались с использованием оборудования фото-микроскопии (CCD видеокамера 8, набор увеличительных колец 9, делитель пучка 10).

Текстурирование образцов алюминиево-магниевого сплава (АМГ6) проводилось в воздушной среде иттербиевым наносекундным импульсным волоконным лазером IPG-Photonics с длиной волны 1064 нм. Во время обработки лазер перемещался гальваносканером в двух направлениях, параллельных относительно обрабатываемой поверхности.

Микрорельеф образцов исследовался с помощью профилометрического комплекса «MicroMeasure 3D station». Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Hitachi S-3400N использовался для анализа морфологии поверхностей. Элементный состав приповерхностных слоев образцов определен методами энергодисперсионной (ЭДС) и рентгеновской фотоэлектронной (РФЭС) спектроскопии с использованием СЭМ Hitachi S-3400N с блоком химического анализа EDS Bruker XFlash 40 и фотоэлектронного спектрометра ESCALAB HP.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований свойств смачиваемости поверхностей сплава АМГ6, текстурированных лазерным излучением.

Анализ воздействия одиночного лазерного импульса на поверхность сплава АМГ6 показал, что на поверхности формируется элемент текстуры – кратер. Определены параметры импульсной наносекундной лазерной обработки, обеспечивающие получение новых типов гидрофобных и гидрофильных поверхностей с упорядоченной и анизотропной текстурами.

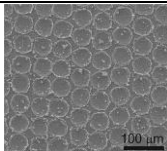
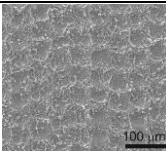
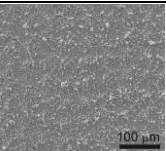
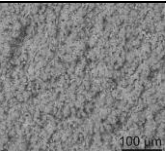
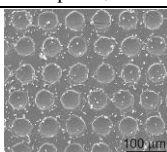
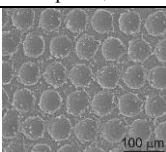
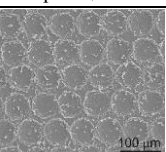
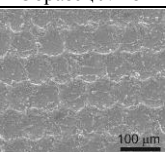
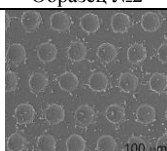
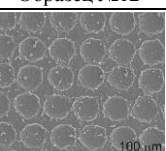
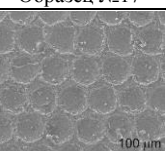
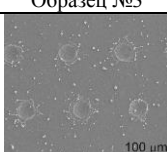
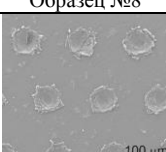
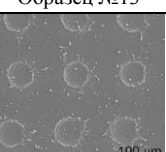
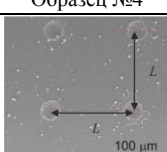
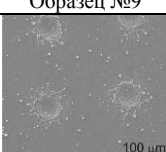
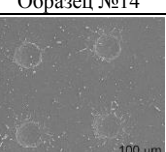
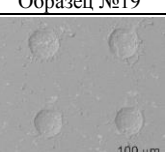
Подготовлено четыре серии образцов (таблица 1) в условиях постоянной частоты излучения ($f = 20$ кГц): I серия – интенсивность импульса $I_{\text{и}} = 142$ МВт/см², длительность $\tau = 100$ нс; II серия – $I_{\text{и}} = 71$ МВт/см², $\tau = 200$ нс; III серия – $I_{\text{и}} = 354$ МВт/см², $\tau = 100$ нс; IV серия – $I_{\text{и}} = 177$ МВт/см², $\tau = 200$ нс.

Расположение элементов в форме кратеров относительно друг друга характеризовалось периодом текстуры L (расстояние между центрами соседних элементов в продольном и поперечном направлениях) и контролировалось скоростью перемещения луча лазера (v) и количеством линий прохода на 1 мм (n). В каждой серии сформировано пять образцов, отличающихся периодом текстуры от 47,0 до 198,0 мкм.

На поверхностях образцов № 1–5, 7–10, 12–15, 17–20 сформирована текстура отдельно расположенными кратерами и агломератами в виде струек и капель закристаллизованного металла. Диаметр кратеров $d_{\text{кр}}$ возрастает от I к IV серии образцов. На образцах № 6 и 17 сформирована текстура в виде сотовой решетки наложением кратеров друг на друга. Каждая ячейка характеризуется кромкой неправильной полигональной формы, чашеобразным дном с хаотично расположенными в нём струйками и каплями

металла. Текстура образцов № 11 и 16 образовалась струйками и каплями закристаллизованного металла в условиях наложения одиночного фокусированного пятна лазерного импульса.

Таблица 1 – Фотоизображения текстур и их геометрические характеристики

Период текстуры, мкм	Номер серии образцов / диаметр кратера $d_{кр}$, мкм			
	I / $45,5 \pm 1,3$	II / $55,3 \pm 0,9$	III / $62,0 \pm 0,5$	IV / $65,3 \pm 1,5$
47,0	 Образец №1	 Образец №6	 Образец №11	 Образец №16
67,3	 Образец №2	 Образец №7	 Образец №12	 Образец №17
74,7	 Образец №3	 Образец №8	 Образец №13	 Образец №18
140,0	 Образец №4	 Образец №9	 Образец №14	 Образец №19
198,0	 Образец №5	 Образец №10	 Образец №15	 Образец №20

Шероховатость – доминирующий фактор, влияющий на смачиваемость. Оценка шероховатости сформированных текстур проведена с использованием трехмерных параметров шероховатости. Амплитудные параметры: Sa – среднее арифметическое отклонение поверхности; Sz – максимальная высота неровностей, характеризующая энергетические барьеры, преодолеваемые движущейся контактной линией; Ssk – асимметрия

(преобладание выступов или впадин); Sku – эксцесс (характеризует форму выступов). Гибридные параметры: Sdq – среднеквадратичный градиент поверхности (мера отклонения поверхности от молекулярно-гладкой); Sdr – развернутое соотношение пограничной площади поверхности (приращение площади в процентах).

С использованием функции спектральной плотности мощности (ФСПМ) шероховатости проведена статистическая оценка сформированных текстур. Определена их однородность, пространственная взаимосвязь высот неровностей и углублений (их периодичность).

По результатам анализа фотоизображений текстур, сравнения трехмерных параметров шероховатости и статистической оценки условно выделено две группы текстур, сформированных на поверхности сплава АМГ6 лазерным излучением. К первой группе относится поверхность с анизотропной, разноуровневой (от нано- до микро-масштаба) текстурой (образец № 16), характеризующаяся пористостью. Вторая группа объединяет поверхности (образцы № 1–15, 17–20), текстура которых упорядочена, образована отдельными элементами, форма которых зависит от параметров луча лазера.

Смачивание поверхностей исследовалось при дозировании капли дистиллированной воды объемом 10 мкл. Экспериментально установлено, что статический контактный угол (СКУ) на полированной поверхности сплава АМГ6 составил $\theta = 88,1 \pm 2,6^\circ$. Непосредственно после текстурирования зарегистрировано полное смачивание образцов с $L = 47,0$ мкм.

Установлено, что изменение СКУ во времени после текстурирования (рисунок 3) аппроксимируется экспоненциальной зависимостью:

$$\theta = \theta_{\text{уст}} \left(1 - e^{-t/a}\right), \quad (1)$$

где $\theta_{\text{уст}}$ – установившийся контактный угол на текстурированной поверхности, °; a – константа, характеризующая время, за которое контактный угол превысит 50% от установившегося значения, сут.; t – время стабилизации свойств смачиваемости, сут.

Также установлено, что с увеличением периода текстуры время стабилизации свойств смачиваемости (время, за которое контактный угол перестанет изменяться) уменьшается (рисунок 3). На поверхностях с текстурами, сформированными при длительности импульса 200 нс (серии II и IV в таблице 1), смачивающие свойства стабилизируются медленнее. Стабилизация свойств смачиваемости образцов с упорядоченной текстурой происходит за 7–90 дней, установившиеся СКУ находятся в диапазоне от $74,0^\circ$ до $100,2^\circ$ (время стабилизации и углы зависят от периода текстуры и параметров лазерного излучения). На поверхности с анизотропной текстурой зарегистрирован наиболее медленный рост СКУ, после 120 дней поверхность демонстрировала гидрофобные свойства с $\theta = 131,0^\circ \pm 4,6^\circ$ (рисунок 3).

На рисунке 4 представлены зависимости статических контактных углов, измеренных после обработки поверхностей лазерным излучением, от периода текстуры. Установлено, что изменять свойства смачиваемости от

супергидрофильности до гидрофобности (рисунок 4) можно изменением расстояния между центрами соседних элементов текстуры.

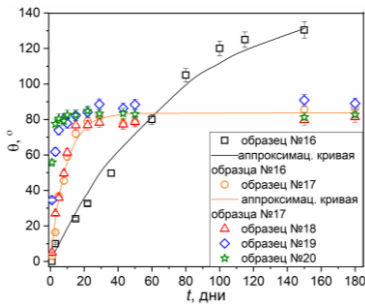


Рисунок 3 – Изменение SKU во времени на образцах IV серии

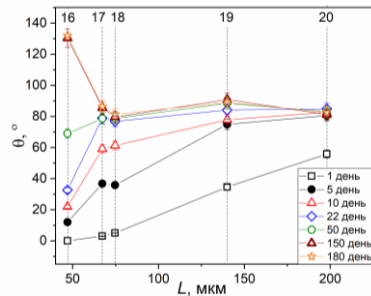


Рисунок 4 – Зависимости SKU от периода текстуры (образцы IV серии)

Известно, что помимо шероховатости на смачивание влияет химический состав приповерхностного слоя. При лазерной обработке поверхностей сплава АМГ6 инициировалась реакция окисления, изменялся элементный состав приповерхностного слоя. Методом ЭДС установлено, что доля кислорода в элементном составе приповерхностного слоя образца с анизотропной текстурой увеличилась до 43,0 % в сравнении с полированной 0,7 %. Также установлено, что на образцах с упорядоченной текстурой содержание кислорода неравномерно по поверхности и уменьшается с увеличением периода текстуры. В центре кратера доля кислорода меньше, чем на кромках. Сформулирована гипотеза о том, что неравномерное распределение кислорода после лазерного текстурирования связано не только с термохимическим механизмом преобразований в металле приповерхностного слоя, но и с длительностью периода релаксации теплового поля, а также с механизмом формообразования элемента текстуры. Последний связан с ударной волной, инициированной световым излучением, которая является следствием как расширения металла при его нагреве до сверхвысоких температур, так и испарения с поверхности.

Методом ЭДС зарегистрировано, что в составе приповерхностного слоя текстурированных образцов помимо элементов, входящих в сплав, и кислорода, присутствует углерод. Накопление углеродных соединений на поверхности уменьшает поверхностную энергию и способствует инверсии смачиваемости. Проведен РФЭС анализ образцов с анизотропной текстурой непосредственно после ее нанесения (супергидрофильных) и через 120 дней после обработки (гидрофобных). Зарегистрировано увеличение углеродных соединений в приповерхностном слое образцов во времени после обработки. Со временем после нанесения текстуры на поверхностях сплава АМГ6 накапливаются органические загрязнения в виде С-С и CH_x фрагментов.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального определения динамических характеристик процесса растекания капель жидкости по поверхностям сплава АМГ6.

Установлен физический механизм перемещения линии трехфазного контакта (ЛТК) по поверхностям с упорядоченной и анизотропной текстурами, сформированными наносекундным лазерным излучением. Проведен анализ влияния характеристик микротекстуры на макроскопический параметр процесса растекания жидкости – скорость перемещения ЛТК (рисунок 5). Расход воды в экспериментах варьировался от 10 до 600 мкл/мин.

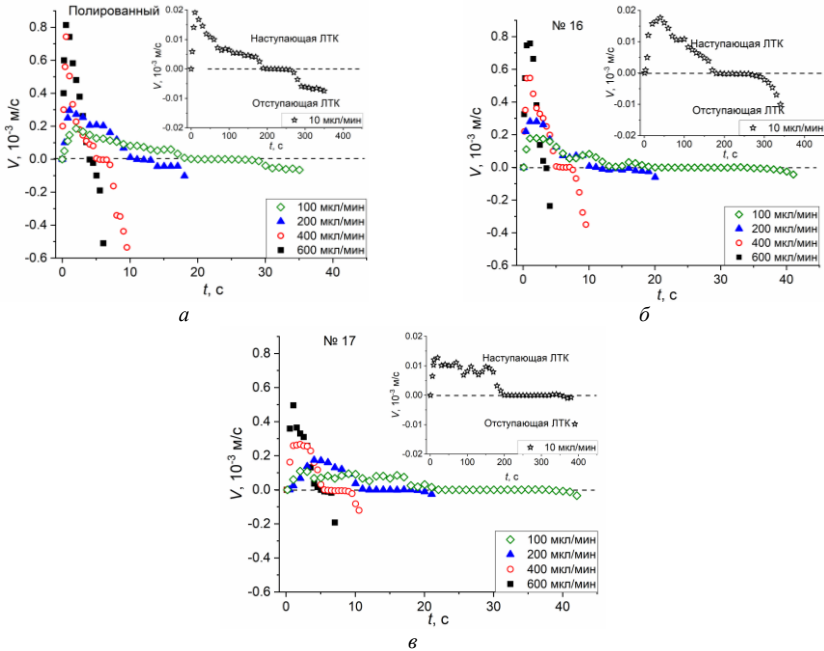


Рисунок 5 – Зависимости скорости перемещения ЛТК от времени, полученные в условиях стабилизации свойств смачиваемости на образцах: а – полированном, б – с анизотропной и в – упорядоченной текстурами

Из рисунка 5 а видно, что на полированном образце скорость перемещения ЛТК больше, чем на образцах, текстурированных лазерным излучением, по причине того, что на его поверхности углубления и выступы намного меньше по размерам. Скорость перемещения ЛТК по поверхности с анизотропной текстурой (рисунок 5 б) выше, чем на поверхностях с упорядоченной текстурой (рисунок 5 в), несмотря на то, что поверхность с анизотропной текстурой более шероховатая (параметры шероховатости почти в десять раз больше параметров упорядоченных текстур). Сформулирована гипотеза о том, что на скорость перемещения ЛТК

оказывают влияние режимы смачивания – гомогенный (полное заполнение жидкостью углублений) и гетерогенный (частичное проникновение жидкости в углубления рельефа, образуются локальные «воздушные подушки»). Более быстрое перемещение ЛТК на образце с анизотропной текстурой можно объяснить тем, что на такой поверхности с гидрофобными свойствами (в условиях стабилизации свойств смачиваемости) реализуется гетерогенное смачивание, а на поверхностях с упорядоченной текстурой – гомогенное. Гетерогенный режим приводит к проскальзыванию и снижению гидродинамического сопротивления трению потока, следовательно, скорость перемещения ЛТК увеличивается.

В условиях растекания капли с расходом 10 мкл/мин по поверхностям с упорядоченной текстурой зарегистрированы флуктуации скорости перемещения линии трехфазного контакта (рисунок 5 в). Установлено, что флуктуации связаны с геометрической формой ЛТК. В таких условиях при растекании линия трехфазного контакта принимает форму многоугольника. С увеличением объема капли ее диаметр увеличивается, линия передвигается, изменяя форму. Изменение геометрической формы от одной к другой сопровождается ускорением движения, вследствие чего возникают флуктуации. При этом ЛТК принимает метастабильную форму. При растекании с расходом от 100 до 600 мкл/мин флуктуаций не обнаружено.

Установлено, что помимо управления скоростью перемещения линии трехфазного контакта, можно регулировать диаметр растекания капли d_{pin} (рисунок 6). Наибольший диаметр растекания соответствует полированной поверхности, максимальная высота неровностей которой равна $Sz=0,56$ мкм. На образцах с упорядоченной текстурой диаметр растекания уменьшается с увеличением параметра Sz и уменьшением периода текстуры. Стоит отметить, что уменьшение d_{pin} зависит не только от высоты неровностей (характеризуемых Sz), но также обусловлено уменьшением степени

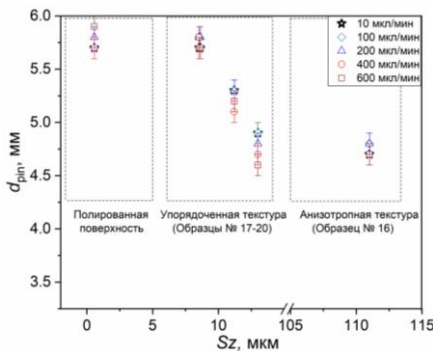


Рисунок 6 – Типичные зависимости диаметра растекания в условиях пиннинга ЛТК от амплитудного параметра шероховатости Sz при растекании капли по образцам IV серии и полированной поверхности

преобладания впадин относительно выступов (ростом параметра асимметрии поверхности Ssk).

Диаметр растекания капли на образце с анизотропной текстурой (№ 16) уменьшился на 20% в сравнении с полированной поверхностью (рисунок 6). Стоит отметить, что текстуры образцов № 16 и № 17 (IV серии) значительно отличаются шероховатостью, характеризваемой, соответственно, $Sz=111,00$ мкм и $Sz=13,00$ мкм. Близкие значения диаметров растекания капель на этих образцах со столь различной шероховатостью

можно объяснить в рамках сформулированной гипотезы о реализации режимов смачивания. На образце № 17 реализуется гомогенное смачивание, на образце № 16 – гетерогенное. При растекании капли по поверхности с анизотропной текстурой наличие воздуха в углублениях снижает сопротивление движению потока жидкости, поэтому влияние шероховатости на диаметр растекания уменьшается.

Гистерезис контактного угла (ГКУ) характеризует отклонение СКУ от равновесного. На полированном и текстурированных образцах гистерезис определен в условиях натекания и оттекания жидкости (с расходом от 10 до 600 мкл/мин) при ее подаче и откачивании методом «bottom-up».

По зависимостям ДКУ натекания и оттекания от безразмерной скорости перемещения ЛТК, выраженной числом капиллярности ($Ca = \mu V / \sigma$, где μ – коэффициент динамической вязкости и σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, V – экспериментально зарегистрированная скорость перемещения ЛТК), установлены различия в механизмах перемещения ЛТК по полированной поверхности и с упорядоченной текстурой (рисунок 7).

В условиях растекания капли воды по полированному образцу гистерезис контактного угла ($\Delta\theta_n$) равен 13°.

Последний определен по формуле:

$$\Delta\theta = \theta_{0n} - \theta_{0от} \quad (2)$$

где θ_{0n} и $\theta_{0от}$ – ДКУ натекания и оттекания при постоянной смоченной площади (при числах капиллярности, равных нулю).

Типичная зависимость $\theta_d = f(Ca)$, полученная на образце с упорядоченной текстурой (№ 19), пересекает ось ординат (при $Ca = 0$) в четырех точках: 73,5°; 70,4°; 62,0° и 51,0°. Последнее обусловлено тем, что при числах капиллярности, стремящихся к нулю, линия трехфазного контакта

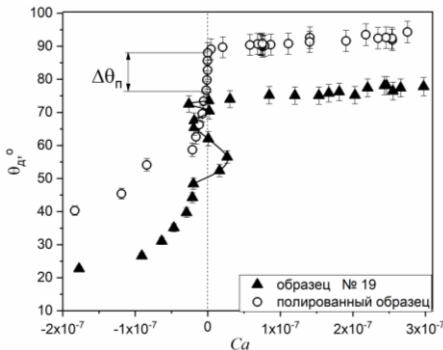


Рисунок 7 – Типичные зависимости ДКУ от числа капиллярности при расходе 10 мкл/мин, полученные на полированной поверхности и образце с упорядоченной текстурой

совершает флуктуационные движения в направлении натекания и оттекания жидкости по поверхности. В этом случае ГКУ согласно уравнению (2) находится в диапазоне от $\Delta\theta_{№19} = 73,5 - 70,4 = 3,1^\circ$ до $\Delta\theta_{№19} = 73,5 - 51,0 = 22,5^\circ$. Предложен подход к определению ГКУ 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 жидкости при числах капиллярности, стремящихся к нулю. На временной зависимости диаметра капли (рисунок 8) определяется точка 1, соответствующая окончанию растекания ($Ca = 0$). На зависимости $\theta_d = f(Ca)$ (рисунок 9) этой точке соответствует угол натекания θ_{0n} .

На зависимости $d = f(t)$ (рисунок 8) от точки 1 на расстоянии, равном половине характерного размера элемента текстуры (диаметра кратера), проводятся прямые параллельно оси абсцисс. По окончании процесса растекания (точка 1 на рисунках 8, 9) линия трехфазного контакта не зацепляется (не пиннингуются), а совершает флуктуационные движения в направлении натекания и оттекания жидкости по поверхности при числах капиллярности, стремящихся к нулю. По зависимости $d = f(t)$ определяется момент времени (точка 2 на рисунке 8), когда жидкость в условиях флуктуационных движений переместится из области, равной диаметру элемента текстуры $d_{кр}$ (области, ограниченной параллельными прямыми). Точке 2 соответствует диаметр капли, который уменьшился на величину, превышающую размер элемента текстуры. Динамический контактный угол оттекания $\theta_{0от}$ в точке 2 (рисунок 9), определяется по зависимости $\theta_d = f(Ca)$ (рисунок 9). Тогда ГКУ равен $\Delta\theta_{№19} = 73,5 - 56,5 = 17,0^\circ$.

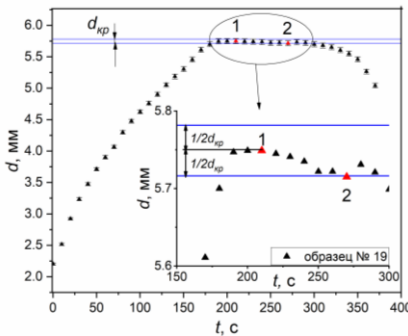


Рисунок 8 – Изменение диаметра капли во времени при ее формировании методом «bottom-up» на образце с упорядоченной текстурой

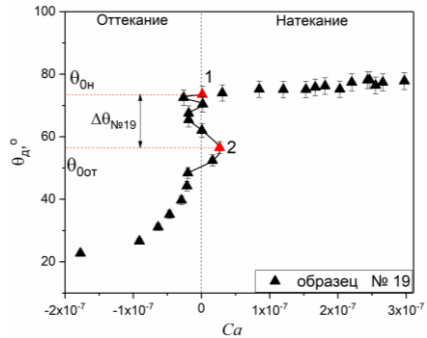


Рисунок 9 – Зависимость ДКУ от числа капиллярности, полученная для образца с упорядоченной текстурой

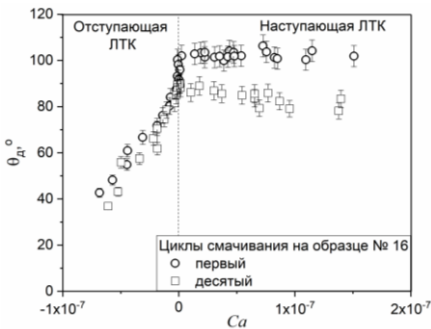


Рисунок 10 – Зависимости ДКУ от числа капиллярности, полученные для образца с анизотропной текстурой при расходе 10 мкл/мин

Установлено, что в условиях растекания капли по поверхности с анизотропной текстурой ДКУ натекания уменьшается с ростом последовательных циклов смачивания, а ДКУ оттекания не зависит от этих циклов (рисунок 10). Стоит отметить, что в условиях растекания капли по полированной поверхности и с упорядоченной текстурой ДКУ натекания и оттекания не зависят от количества последовательных циклов смачивания. Сформулирована

гипотеза о том, что в условиях растекания капли по поверхности с анизотропной текстурой уменьшение ДКУ натекания с ростом числа циклов смачивания обусловлено тем, что с каждым новым циклом жидкость проникает глубже в пористую структуру приповерхностного слоя.

Проведен анализ влияния расхода жидкости и времени, прошедшего после текстурирования, на гистерезис контактного угла (рисунок 11). Установлено, что при дозировании капли в условиях увеличения расхода с 10 до 600 мкл/мин ГКУ уменьшается на полированной поверхности (с $13,0^\circ$ до $3,9^\circ$) и на поверхностях с упорядоченной текстурой (например, в условиях стабилизации свойств смачиваемости для образца № 17 с $33,0^\circ$ до $20,0^\circ$). Это можно объяснить тем, что с ростом расхода дозирование капли её кинетическая энергия увеличивается. Последняя расходуется на преодоление энергетических барьеров. Капля с большей кинетической энергией в меньшей степени «зацепляется» за неровности, поэтому гистерезис снижается.

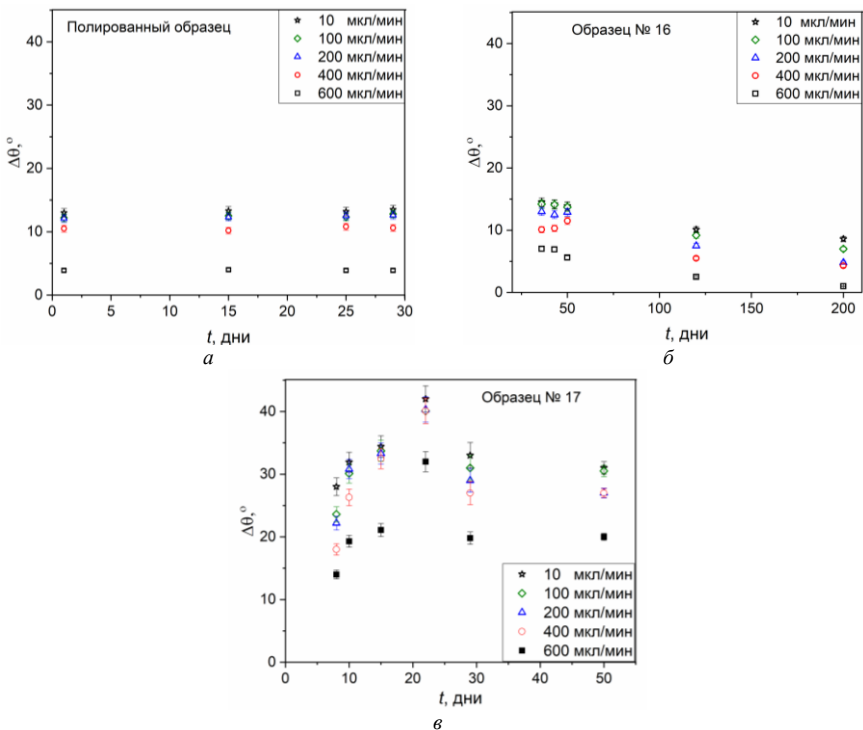


Рисунок 11 – Зависимости ГКУ от времени, прошедшего после текстурирования, на образцах: *а* – полированном, *б* – с анизотропной и *в* – упорядоченной текстурами

На полированном образце гистерезис во времени (рисунок 11 *а*) не изменяется. На образцах с упорядоченной текстурой зависимости ГКУ от времени (рисунок 11 *в*) имеют максимумы: от $11,9^\circ$ до $43,0^\circ$ в зависимости

от расхода жидкости и периода текстуры. Получены выводы о том, что после лазерного текстурирования рост ГКУ во времени на поверхности сплава АМГ6, текстура которого образована элементами в форме кратеров, обусловлен неравномерным изменением во времени свойств смачиваемости по поверхности. В центре кратера, на его кромке и в необработанных лазерным излучением участках поверхности элементный состав различен. Свойства смачиваемости этих участков также различаются. Во времени текстура поверхности не изменяется, а изменение свойств смачиваемости кратеров, кромок и необработанных областей различна. Гистерезис растёт, достигая максимальных значений в условиях наибольшей анизотропии свойств смачиваемости по поверхности. Далее с течением времени различия в свойствах смачиваемости этих областей уменьшаются, зависимость гистерезиса от времени уменьшается.

С уменьшением периода текстуры изменение свойств смачиваемости происходит медленнее, следовательно, наибольшая анизотропия свойств по поверхности достигается позже, например, на образцах с $L = 198,0$ мкм через 5–10 дней, а на образцах с $L = 67,3$ мкм через 15–20 дней.

Изменение гистерезиса во времени на анизотропной текстуре имеет другой характер (рисунок 11 б): со временем он снижается и становится равным $8,6^\circ$, что меньше значения, определенного на полированной поверхности. Сформулирована гипотеза о том, что на ГКУ оказывают влияние режимы смачивания: гомогенный или гетерогенный, известные также под названием состояния Венцеля и Касси–Бакстера, соответственно.

Состояние капли характеризуется углом скатывания и гистерезисом. В условиях стабилизации свойств смачиваемости текстурированные поверхности проявляли сверхвысокую адгезию при дозировании капли воды. Угол скатывания зарегистрировать не удалось (при повороте образцов на 180° капля не скатывалась). По экспериментальным значениям ГКУ сделано предположение о том, что на упорядоченных текстурах и полированной поверхности реализуется гомогенный режим смачивания (состояние Венцеля), на анизотропной – гетерогенный.

С использованием оборудования фото-микроскопии получены результаты подтверждающие, что в условиях стабилизации свойств смачиваемости на образце с анизотропной текстурой при дозировании на нее капли воды во впадинах (под жидкостью) образуются «воздушные подушки», если их несмоченная площадь превышает удвоенную площадь поверхности «жидкость–газ». Разрушение этих «подушек» и заполнение впадин жидкостью (переход из гетерогенного в гомогенный режим смачивания) происходит неравномерно по поверхности из-за внутреннего капиллярного давления Лапласа, которое увеличивается при осаждении капли на поверхность. Такой переход сопровождается незначительным уменьшением геометрических размеров капли: контактного угла с $131,0^\circ$ до $129,0^\circ$, высоты с 2,2 мм до 2,0 мм и контактного диаметра с 2,12 до 2,08 мм.

Проведен анализ областей применения известных математических моделей при описании динамического процесса растекания капли по текстурированным лазерным излучением и полированной поверхностям сплава АМГ6 (рисунок 12). Модели описывают два различных механизма: молекулярно-кинетическая (МКМ) – диссипация энергии при растекании жидкости происходит вследствие трения вблизи ЛТК, гидродинамическая (ГДМ) – из-за вязкого рассеяния. Полученные зависимости ДКУ от числа капиллярности аппроксимированы с использованием линейной и классической МКМ (Т. Д. Блейк), а также ГДМ (О. В. Воинов, Р. Кокс).

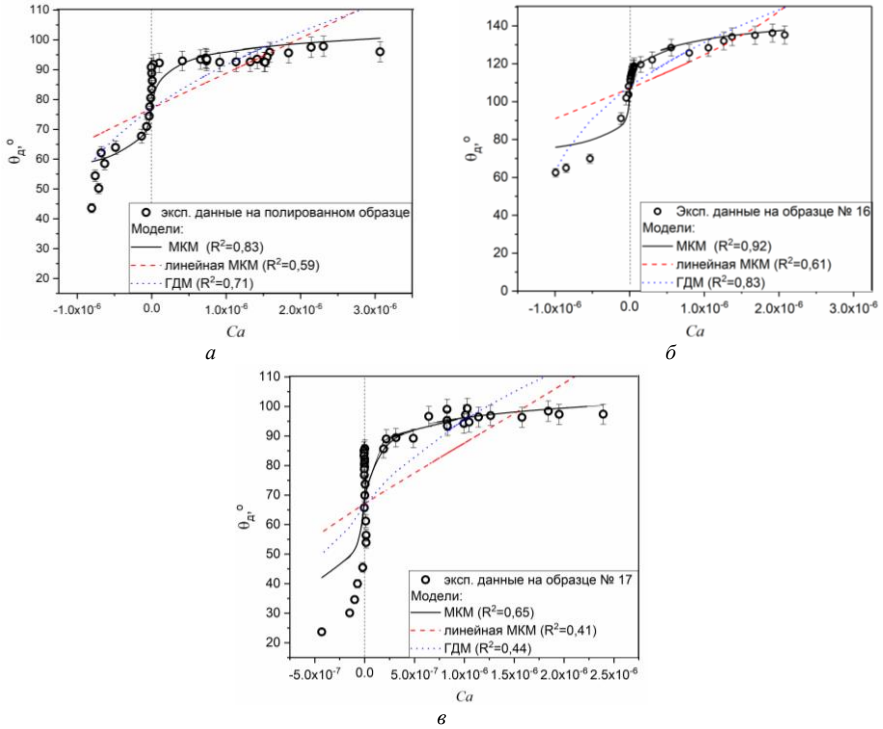


Рисунок 12 – Типичные зависимости ДКУ от числа капиллярности, полученные при расходе 100 мкл/мин на образцах: *a* – полированном, *б* – с анизотропной и *в* – упорядоченной текстурами

Установлено, что зависимости, полученные при расчетах классической МКМ, лучше описывают экспериментальные данные по сравнению с линейной МКМ и ГДМ. Причем, для данных, полученных на поверхностях с меньшим ГКУ, достигается лучшее согласование. Последнее подтверждается коэффициентами детерминации R^2 : на образце с анизотропной текстурой ($\Delta\theta = 6^\circ$) – $R^2(\text{МКМ}) = 0,92$; на полированном ($\Delta\theta = 12^\circ$) – $R^2(\text{МКМ}) = 0,83$; с упорядоченной текстурой №17 ($\Delta\theta = 31^\circ$) – $R^2(\text{МКМ}) = 0,65$.

При аппроксимации ДКУ натекания и оттекания от Ca по отдельности (без учета ГКУ) достигнут меньший разброс значений параметров моделей и большие величины коэффициента детерминации R^2 .

По результатам проведенного анализа обоснована возможность применения молекулярно-кинетической модели к описанию процессов перемещения жидкости в области малых чисел капиллярности от 10^{-10} до 10^{-5} по поверхностям сплава АМГ6 с упорядоченной и анизотропной текстурами, сформированными лазерным излучением. Установлено, что диссипация энергии вследствие трения вблизи ЛТК, перемещение которой обусловлено адсорбцией/десорбцией молекул жидкости, является доминирующим фактором, определяющим динамику ЛТК «поверхность алюминий-магниевого сплава–воздух–дистиллированная вода».

Анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований, выполненных с использованием достаточно типичной жидкости и широко применяемого в промышленности алюминий-магниевого сплава, дают основания для вывода о том, что текстурирование поверхностей металлов и сплавов лазерным излучением создает объективные предпосылки для управления процессами смачивания и растекания малых объемов жидкости по текстурированным поверхностям.

В заключении подведены итоги диссертационного исследования, сформулированы основные результаты и выводы:

1. Обоснована возможность управления смачиванием и растеканием малых объемов жидкости за счет текстурирования лазерным излучением поверхностей алюминий-магниевого сплава.

2. Установлено, что изменением периода текстуры, сформированной лазерным излучением, можно контролировать свойства смачиваемости поверхностей алюминий-магниевого сплава от супергидрофильности (характеризующейся статическим контактным углом, равным 0°) до гидрофобности ($132,0^\circ$).

3. 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.

4. Гетерогенное смачивание (частичное проникновение жидкости в углубления рельефа и локальные «воздушные подушки») способствует увеличению скорости перемещения линии трехфазного контакта в условиях растекания жидкости по поверхности образца с анизотропной текстурой.

5. Сформулирована гипотеза о том, что в условиях растекания капли по поверхности с анизотропной текстурой уменьшение динамического контактного угла натекания с ростом циклов смачивания обусловлено тем, что с каждым новым циклом жидкость глубже проникает в пористую структуру приповерхностного слоя, углы оттекания не зависят от этих циклов.

6. Установлено, что изменением текстуры можно изменять диаметр растекания капли на поверхностях алюминий-магниевого сплава, обработанных наносекундным лазерным излучением.

7. Диаметр растекания капли на поверхностях алюминий-магниевого сплава с упорядоченной текстурой зависит не только от высоты неровностей, но и от преобладания выступов или впадин.

8. 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.

9. 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.

10. Экспериментально зарегистрированный переход из гетерогенного (частичное проникновение жидкости в углубления рельефа и локальные «воздушные подушки») к гомогенному (полное заполнение углублений жидкостью) режиму смачивания поверхностей алюминий-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.

11. Установлено, что доминирующим механизмом при движении линии трехфазного контакта по текстурированным поверхностям металлов в области малых чисел капиллярности от 10^{-10} до 10^{-5} являются молекулярные перемещения (адсорбция молекул жидкости твердой поверхностью).

12. Установлена возможность применения классической молекулярно-кинетической модели к описанию процесса растекания малых объемов жидкости по поверхностям алюминий-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} .

СПИСОК ТРУДОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Кузнецов Г. В. Режимы растекания капли воды по подложкам с различной смачиваемостью / Г. В. Кузнецов, Д. В. Феоктистов, **Е. Г. Орлова** // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 2. – С. 310–315. – 0,42 / 0,14 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Kuznetsov G. V. Regimes of spreading of a water droplet over substrates with varying wettability / G. V. Kuznetsov, D. V. Feoktistov, **E. G. Orlova** // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2016. – Vol. 89, № 2. – P. 317–322. – DOI: 10.1007/s10891-016-1381-0.

2. Кузнецов Г. В. Влияние скорости образования капли при растекании по микроструктурированной поверхности на краевой угол / Г. В. Кузнецов, Д. В. Феоктистов, **Е. Г. Орлова**, И. Ю. Зыков, К. Батищева // Теплофизика и аэромеханика. – 2018. – Т. 25, № 2. – С. 247–254. – 0,5 / 0,1 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Kuznetsov G. V. The influence of the drop formation rate at spreading over a microstructured surface on the contact angle / G. V. Kuznetsov, D. V. Feoktistov, **E. G. Orlova**, I. Y. Zykov, K. Batishcheva // Thermophysics and Aeromechanics. – 2018. – Vol. 25, № 2. – P. 237–244. – DOI: 10.1134/S0869864318020099.

3. **Orlova E. G.** 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 // European Journal of Mechanics–B/Fluids. – 2018. – Vol. 68. – P. 118–127. – DOI: 10.1016/j.euromechflu.2017.12.002. – 1,05 / 0,32 а.л. (*Web of Science*).

4. Kuznetsov G. V. Unification of the textures formed on aluminum after laser treatment / G. V. Kuznetsov, D. V. Feoktistov, **E. G. Orlova**, K. A. Batishcheva, S. S. Ilenok // Applied Surface Science. – 2019. – Vol. 469. – P. 974–982. – 1,38 / 0,41 а.л. (*Web of Science*).

Статья в зарубежном научном журнале, входящем в Scopus (опубликована онлайн):

5. Kuznetsov G. V. 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 // Journal of Colloid and Interface Science. – 2019. – Vol. 553. – P. 557–566. – DOI: 10.1016/j.jcis.2019.06.059. (Published online: 18 June 2019 by Elsevier). – 1,66 / 0,5 а.л. (*Scopus*).

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в зарубежных научных изданиях, входящих в Web of Science и/или Scopus:

6. Feoktistov D. V. Spreading behavior of a distilled water droplet on a superhydrophobic surface [Electronic resource] / D. V. Feoktistov, **E. G. Orlova**, A. G. Islamova // MATEC Web of Conferences. – 2015. – Vol. 23 : Conference on Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment. Tomsk, Russia, April 22–23, 2015. – Article number 01054. – 4 p. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2015/04/mateconf_tsotr2015_01054.pdf (access date: 03.09.2019). – DOI: 10.1051/mateconf/20152301054. – 0,26 / 0,13 а.л. (*Web of Science*).

7. **Orlova E. G.** Dynamic contact angle and three-phase contact line of water drop on copper surface [Electronic resource] / E. G. Orlova, D. V. Feoktistov, K. A. Batishcheva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –

2015. – Vol. 93, is. 1 : 21st International Conference for Students and Young Scientists: Modern Technique and Technologies (MTT 2015). Tomsk, October 05–09, 2015. – Article number 012010. – 6 p. – URL: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/20089/1/dx.doi.org-10.1088-1757-899X-93-1-012010.pdf> (access date: 03.09.2019). – DOI: 10.1088/1757-899X/93/1/012010. – 0,34 / 0,11 а.л. (*Scopus*).

8. Feoktistov D. V. Experimental investigation of the contact angle at wetting the non-ferrous metals [Electronic resource] / D. V. Feoktistov, **E. G. Orlova**, K. O. Ponomarev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 93, is. 1 : 21st International Conference for Students and Young Scientists: Modern Technique and Technologies (MTT 2015). Tomsk, October 05–09, 2015. – Article number 012011. – 5 p. – URL: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/20092/1/dx.doi.org-10.1088-1757-899X-93-1-012011.pdf> (access date: 03.09.2019). – DOI: 10.1088/1757-899X/93/1/012011. – 0,29 / 0,14 а.л. (*Scopus*).

9. Feoktistov D. V. Spreading modes on copper and steel surfaces [Electronic resource] / D. V. Feoktistov, **E. G. Orlova**, A. G. Islamova // EPJ Web of Conferences. – 2016. – Vol. 110 : Conference on Thermophysical Basis of Energy Technologies. Tomsk, Russia, October 13–15, 2015. – Article number 01018. – 4 p. – URL: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2016/05/epjconf_toet2016_01018.pdf (access date: 03.09.2019). – DOI: 10.1051/epjconf/201611001018. – 0,22 / 0,1 а.л. (*Web of Science*).

10. Kuznetsov G. V. Contact angle hysteresis of a drop spreading over metal surfaces [Electronic resource] / G. V. Kuznetsov, D. V. Feoktistov, **E. G. Orlova** // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 84 : International Symposium and School of Young Scientists on Interfacial Phenomena and Heat Transfer (IPHT 2016). Novosibirsk, Russia, March 02–04, 2016. – Article number 00019. – 7 p. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/47/mateconf_ipht2016_00019.pdf (access date: 03.09.2019). – DOI: 10.1051/mateconf/20168400019. – 0,41 / 0,14 а.л. (*Web of Science*).

11. **Orlova E. G.** Dynamic wetting and dewetting: comparison of experiment with theories [Electronic resource] / E. G. Orlova, E. R. Malyhina, D. V. Feoktistov, L. S. Zhidkova // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 72 : Conference on Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment (HMTTSC 2016). Tomsk, Russia, April 19–21, 2016. – Article number 01062. – 6 p. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/35/mateconf_hmttsc2016_01062.pdf (access date: 03.09.2019). – DOI: 10.1051/mateconf/20167201062. – 0,29 / 0,17 а.л. (*Web of Science*).

12. Feoktistov D. V. Mechanism of contact line movement of a droplet spreading over a solid surface [Electronic resource] / D. V. Feoktistov, **E. G. Orlova**, A. G. Islamova // MATEC Web of Conferences – 2016. – Vol. 91 :

4th International Youth Forum on Smart Grids. Tomsk, Russia, October 10–14, 2016. – Article number 01026. – 6 p. – URL: https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/05/mateconf_smart2017_01026.pdf (access date: 03.09.2019). – DOI: 10.1051/mateconf/20179101026. – 0,24 / 0,12 а.л. (*Web of Science*).

Публикации в прочих научных изданиях:

13. **Орлова Е. Г.** Растекание капли воды на твердых поверхностях / Е. Г. Орлова, Д. В. Феоктистов // Тинчуринские чтения : материалы докладов X Международной молодежной научной конференции. Казань, 25–27 марта 2015 г. – Казань, 2015. – Т. 2. – С. 10–11. – 0,06 / 0,04 а.л.

14. **Орлова Е. Г.** Экспериментальное исследование процесса растекания капли дистиллированной воды на нержавеющей стали [Электронный ресурс] / Е. Г. Орлова, Д. В. Феоктистов, К. А. Батищева // Современная техника и технологии : сборник трудов XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 05–09 октября 2015 г. – Томск, 2015. – Т. 1. – С. 124–126. – URL: <http://portal.tpu.ru/files/conferences/ctt/proceedings/2015/ctt-2015-1.pdf> (дата обращения: 03.09.2019). – 0,22 / 0,12 а.л.

15. Пономарев К. О. Динамика смачивания при высоких скоростях движения линии трехфазного контакта [Электронный ресурс] / К. О. Пономарев, Д. В. Феоктистов, **Е. Г. Орлова** // Современные техника и технологии : сборник трудов XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 05–09 октября 2015 г. – Томск, 2015 – Т. 1. – С. 147–149. – URL: <http://portal.tpu.ru/files/conferences/ctt/proceedings/2015/ctt-2015-1.pdf> (дата обращения: 03.09.2019). – 0,16 / 0,13 а.л.

16. **Орлова Е. Г.** Изменение краевого угла капли при растекании по поверхностям стальных подложек / Е. Г. Орлова, Д. В. Феоктистов // XXXII Сибирский теплофизический семинар : материалы всероссийской конференции. Новосибирск, 19–20 ноября 2015 г. – Новосибирск, 2015 – С. 127–128. – 0,16 / 0,12 а.л.

17. Пономарев К. О. Изменение динамического контактного угла от числа капиллярности / К. О. Пономарев, Д. В. Феоктистов, **Е. Г. Орлова** // Неделя науки СПбПУ : материалы научного форума с международным участием. Лучшие доклады. Санкт-Петербург, 30 ноября – 05 декабря 2015 г. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 37–40. – 0,35 / 0,25 а.л.

18. Феоктистов Д. В. Влияние объема капли на краевой угол и контактный диаметр в процессе смачивания цветных металлов / Д. В. Феоктистов, **Е. Г. Орлова**, А. Г. Исламова // Неделя науки СПбПУ : материалы научного форума с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Санкт-Петербург, 30 ноября – 05 декабря 2015 г. – Санкт-Петербург, 2015. – Ч. 1. – С. 140–143. – 0,35 / 0,13 а.л.

19. **Орлова Е. Г.** Движение контактной линии растекающейся капли: сравнение экспериментальных результатов с теоретическими зависимостями / Е. Г. Орлова, Д. В. Феоктистов // Неделя науки СПбПУ : материалы научной

конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 14–19 ноября 2016 г. – Санкт-Петербург, 2016. – Ч. 1. – С. 234–236. – 0,19 / 0,1 а.л.

20. **Орлова Е. Г.** Растекание капли воды по алюминиевым поверхностям: сравнение экспериментальных результатов с теоретическими зависимостями / Е. Г. Орлова, Д. В. Феоктистов, Л. С. Жидкова // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики : тезисы докладов XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых с международным участием. Новосибирск, 22–25 ноября 2016 г. – Новосибирск, 2016. – С. 153–154. – 0,14 / 0,11 а.л.

21. **Orlova E. G.** Contact line movement over polished and laser processed metal surface / E. G. Orlova, D. V. Feoktistov, A. G. Islamova // Interfacial Phenomena and Heat Transfer : book of abstracts of 2nd International School of Young Scientists. Novosibirsk, September 11–16, 2017. – Novosibirsk, 2017. – P. 205. – 0,06 / 0,03 а.л.

22. **Орлова Е. Г.** Движение жидкости по текстурированным лазерным излучением металлическим поверхностям в системах капельного охлаждения / Е. Г. Орлова, Д. В. Феоктистов, А. Г. Исламова // ВНКСФ–24 : материалы Двадцать четвертой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых. Томск, 31 марта – 07 апреля 2018 г. – Екатеринбург, 2018. – С. 596–597. – 0,14 / 0,11 а.л.

23. **Орлова Е. Г.** Наносекундное лазерное излучение как способ текстурирования металлической поверхности для применения в системах капельного охлаждения / Е. Г. Орлова, Д. В. Феоктистов, Г. В. Кузнецов // Седьмая Российская национальная конференция по теплообмену : труды. Москва, 22–26 октября 2018 г. – Москва, 2018. – Т. 3. – С. 434–436. – 0,31 / 0,2 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательского Дома Томского государственного университета
Заказ № 6035 от «16» октября 2019 г. Тираж 100 экз.
г. Томск Московский тр.8 тел. 53-15-28