

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

На правах рукописи

**Лага Екатерина Юрьевна**

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ  
НА ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ВСЛЕДСТВИЕ  
ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ  
МЕТАЛЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук  
Феоктистов Дмитрий Владимирович

Томск – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                                                                                                            | 5  |
| ГЛАВА 1.  СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ<br>КАПЕЛЬ НА ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ И ШЛАКОВАНИЯ<br>ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ .....                                                   | 13 |
| 1.1 Современное состояние теории процесса испарения капель,<br>расположенных на теплонагруженных поверхностях .....                                                                                                       | 13 |
| 1.2 Анализ современного состояния теории и практики в области решения<br>проблемы интенсификации теплообмена в энергогенерирующем<br>оборудовании за счет снижения негативных последствий золошлаковых<br>отложений ..... | 17 |
| Выводы по главе 1 .....                                                                                                                                                                                                   | 22 |
| ГЛАВА 2.  ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В УСЛОВИЯХ<br>ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ<br>ПОВЕРХНОСТИ С ЗАДАНЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ И<br>ПРИПОВЕРХНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ.....               | 26 |
| 2.1 Материалы, оборудование и методы исследования.....                                                                                                                                                                    | 27 |
| 2.1.1 Создание поверхностей с заданными геометрическими параметрами<br>и приповерхностными свойствами .....                                                                                                               | 27 |
| 2.1.2 Анализ геометрических параметров поверхностей .....                                                                                                                                                                 | 31 |
| 2.1.3 Экспериментальная установка по исследованию процесса<br>испарения капли теплоносителя.....                                                                                                                          | 32 |
| 2.1.4 Методы и методики определения свойств смачивания .....                                                                                                                                                              | 34 |
| 2.1.5 Методы и методики определения характеристик процесса<br>испарения капли .....                                                                                                                                       | 35 |
| 2.2 Характеристики процесса испарения капель воды, расположенной на<br>теплопередающей поверхности .....                                                                                                                  | 39 |

|          |                                                                                                          |     |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2.1    | Исследование геометрических параметров и свойств смачивания поверхностей .....                           | 39  |
| 2.2.2    | Исследование характеристик испарения.....                                                                | 46  |
| 2.2.2.1  | Анализ изменения геометрических характеристик и скорости испарения капель.....                           | 46  |
| 2.2.2.2  | Анализ охлаждения приповерхностного слоя .....                                                           | 52  |
| 2.2.2.3  | Анализ процесса нуклеации .....                                                                          | 58  |
| 2.2.2.4  | Скорости конвективных потоков в испаряющейся капле .....                                                 | 62  |
|          | Выводы по главе 2.....                                                                                   | 69  |
| ГЛАВА 3. | ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ.....                                        | 71  |
| 3.1      | Экспериментальные исследования .....                                                                     | 71  |
| 3.1.1    | Экспериментальная установка и методы исследования .....                                                  | 72  |
| 3.1.1.1  | Приготовление модельного состава золы .....                                                              | 72  |
| 3.1.1.2  | Оборудование и методика обработки поверхностей стали.....                                                | 73  |
| 3.1.1.3  | Методы и методики исследования поверхностей стали и шлака ....                                           | 75  |
| 3.1.1.4  | Экспериментальная установка .....                                                                        | 75  |
| 3.1.2    | Результаты и обсуждение .....                                                                            | 80  |
| 3.1.2.1  | Анализ микротекстуры и элементного состава модифицированных лазерным излучением поверхностей стали ..... | 80  |
| 3.1.2.2  | Процессы, протекающие при нагреве золы, расположенной на поверхности стали.....                          | 88  |
| 3.1.2.3  | Анализ микротекстуры и элементного состава поверхностей стали после их шлакования .....                  | 94  |
| 3.2      | Натурные испытания.....                                                                                  | 110 |
| 3.2.1    | Оборудование и методика обработки поверхностей стали.....                                                | 110 |
| 3.2.2    | Котельная и топливо.....                                                                                 | 112 |
| 3.2.3    | Методика оценки склонности угля к загрязнению продуктами горения поверхностей нагрева в топке котла..... | 114 |
| 3.2.4    | Методы и методики исследования поверхностей стали.....                                                   | 116 |

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.5 Результаты и обсуждение .....                                                                                   | 117 |
| 3.2.5.1 Анализ склонности угля к загрязнению продуктами горения<br>поверхностей нагрева в топке котла .....           | 117 |
| 3.2.5.2 Анализ характеристик поверхностей стали .....                                                                 | 119 |
| 3.2.5.3 Анализ элементного состава поверхностей стали после проведения<br>натурных испытаний и очистки воздухом ..... | 128 |
| Выводы по главе 3.....                                                                                                | 133 |
| ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....                                                                                     | 136 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....                                                                                               | 139 |
| Приложение А Акт внедрения результатов диссертационной работы .....                                                   | 151 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Разработка систем охлаждения нового поколения для отвода тепловых потоков высокой плотности, а также разработка эффективных систем энергогенерирующего оборудования невозможна без развития фундаментальных знаний в области создания принципиально новых теплопередающих поверхностей, характеризующихся уникальными функциональными свойствами. Современные наукоемкие лазерные технологии относятся к прорывным технологиям в области микротекстурирования поверхностей металлов, в том числе широко используемых в теплоэнергетике алюминиевых сплавов и жаростойких, жаропрочных сталей. Уже достигнутые к настоящему времени результаты показывают, что для решения актуальных задач в области теплотехники и теплофизики лазерные технологии находятся вне конкуренции, поскольку позволяют получить результаты, которые с использованием других технологий либо трудно реализуемы, либо вовсе недостижимы. Актуальность проблемы разработки систем охлаждения нового поколения для отвода тепловых потоков высокой плотности заключается в том, что реализация и развитие достаточно многих перспективных технологий в микроэлектронике, авиационной, космической и нефтехимической промышленности, а также судостроении и промышленной теплоэнергетике сдерживается отсутствием эффективных, надежных и автономных систем, обеспечивающих регламентный температурный режим работы оборудования. В диссертационной работе эта проблема решается путем разработки нового подхода к интенсификации испарения капель, основанного на изменении геометрических параметров и приповерхностных свойств теплопередающих поверхностей вследствие воздействия лазерного излучения.

Сжигание энергетического топлива в топках котлов на тепловых электрических станциях и водяных котельных является наиболее широко распространенным в мире промышленным способом генерации тепловой и электрической энергии. Типичными проблемами сжигания твердых топлив

является отложение продуктов горения и шлакование поверхностей нагрева. Последнее существенно ухудшает теплообмен и снижает эффективность энергогенерирующего оборудования. В мировой практике существуют разные методы борьбы с этими проблемами, но наиболее широко известные способы, как правило, сводятся к изменению состава топлива путем добавления реагентов, которые снижают теплоту сгорания топлива. Поэтому проблема шлакования поверхностей нагрева остается актуальной по настоящее время. В диссертационной работе предложен принципиально новый подход к решению вышеобозначенных проблем, основанный на модификации теплопередающих поверхностей энергогенерирующего оборудования лазерным излучением. Суть нового подхода заключается в формировании приповерхностного слоя, обеспечивающего снижение прочности адгезионного контакта золошлаковых отложений с теплопередающей поверхностью нагрева энергогенерирующего оборудования.

**Цель диссертационной работы** – разработка нового подхода к интенсификации испарения капель в системах охлаждения капельным орошением и снижению прочности адгезионного контакта золошлаковых отложений с теплопередающей поверхностью нагрева энергогенерирующего оборудования за счет модификации интенсивными потоками энергии (лазерным излучением) геометрических параметров и приповерхностных свойств теплопередающих поверхностей.

**Для достижения поставленной цели решались задачи:**

1. Разработка методик экспериментальных исследований процессов теплообмена в условиях испарения капли, расположенной на теплопередающей поверхности с заданными геометрическими параметрами и приповерхностными свойствами; формирование заданных геометрических параметров (текстуры), бифильных и экстремальных свойств смачивания теплопередающих поверхностей; оценка охлаждения приповерхностного слоя на заданной толщине за счет испарения капли теплоносителя.

2. Определение характеристик теплообмена и испарения капли теплоносителя, расположенной на нагретой теплопередающей поверхности, модифицированной лазерным излучением.

3. Определение характеристик приповерхностного слоя (размеров элементов текстуры, их свойств смачивания) теплопередающей поверхности, обеспечивающих интенсификацию теплообмена и испарения капли теплоносителя.

4. Разработка методик проведения экспериментальных исследований и натурных испытаний на действующем объекте теплоэнергетики по определению характеристик формирования золошлаковых отложений; оценка сопротивления модифицированных лазерным излучением теплопередающих поверхностей к золошлаковым отложениям.

5. Определение параметров шероховатости (текстуры) и приповерхностных свойств поверхностей теплообмена, обеспечивающих снижение прочности адгезионного контакта золошлаковых отложений с поверхностью.

6. Анализ процессов, протекающих при формировании шлака на теплопередающей поверхности.

**Соответствие диссертации Паспорту научной специальности.** Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» в части: пункта 5 – «Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей»; пункта 6 – «Экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях»; пункта 9 – «Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты».

**Научная новизна.** Разработан подход к интенсификации процесса охлаждения теплонагруженных поверхностей путем формирования заданной конфигурации микротекстуры, бифильных и экстремальных свойств смачивания.

Разработанный подход также позволяет управлять геометрическими характеристиками капель в процессе их интенсивного испарения на теплонагруженной поверхности. Определены скорости испарения и особенности режимов испарения капель на теплопередающих поверхностях, характеризующихся бифильными свойствами смачивания. Проведена оценка охлаждения приповерхностного слоя на заданной толщине за счет испарения капли теплоносителя. Установлены условия реализации «сухих пятен» и роста скорости испарения капли на завершающей стадии.

Предложен принципиально новый подход к интенсификации теплообмена в энергогенерирующем оборудовании, основанный на формировании специального вида текстуры и заданных приповерхностных свойств теплопередающих поверхностей, обеспечивающих снижение прочности адгезионного контакта золошлаковых отложений с поверхностью. Проведен анализ процессов, протекающих при формировании шлака на модифицированных теплопередающих поверхностях. Определены характеристики растекания шлака.

**Теоретическая и практическая значимость.** Результаты диссертационного исследования являются основой для решения актуальных проблем теплотехники – интенсификации процессов теплообмена и испарения капель теплоносителя в системах охлаждения энергонасыщенного оборудования; интенсификации теплообмена в энергогенерирующем оборудовании за счет снижения негативных последствий формирования золошлаковых отложений. Полученные результаты способствуют развитию фундаментальных знаний о процессах теплообмена и испарения капель теплоносителя, расположенных на теплопередающих поверхностях.

Полученные новые знания о теплообмене при испарении капель, о процессах, протекающих при формировании шлака, на теплопередающих поверхностях, модифицированных интенсивными потоками энергии, являются научной основой для прикладных технологий, направленных на создание перспективных систем охлаждения капельным орошением и повышение срока службы котельного оборудования, профилактики шлакования.

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе в Исследовательской школе физики высокоэнергетических процессов Томского политехнического университета в следующих дисциплинах: «Термодинамика и теплофизика», «Моделирование современных экспериментов в физике высоких энергий», «Взаимодействие излучения с веществом», а также при выполнении НИРС и магистерских диссертаций студентами, обучающимися по направлению 03.04.02 «Физика», образовательная программа «Физика конденсированного состояния», акт внедрения результатов диссертационной работы приведен в Приложении А.

**Связь работы с научными программами и грантами.** Диссертационное исследование выполнено в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», Приоритет-2030-НИП/ЭБ-114-375-2023 и проекта РНФ № 23-73-30004 «Лазерные стратегии в инновационном материаловедении: от авиации и теплоэнергетики до медицины и машиностроения».

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. В условиях, характерных началу формирования паровой фазы теплоносителя, для интенсификации процесса испарения капель воды, расположенных на теплопередающих поверхностях из алюминиевого сплава АМг-2, наиболее предпочтительна комбинация гидрофильных ( $\theta_0 = 87,8^\circ$ ) и супергидрофильных ( $\theta_0 = 0^\circ$ ) свойств смачивания. Для контроля режимов испарения и увеличения скоростей конвективных потоков в капле предпочтительнее на практике использовать бифильные теплопередающие поверхности с комбинацией экстремальных свойств смачиваемости.

2. На завершающей стадии процесса испарения капли длина линии трехфазного контакта является доминирующим фактором, влияющим на рост скорости испарения и количества теплоты, отводимой от теплонагруженной поверхности.

3. Формирование интенсивными потоками энергии (лазерным излучением) заданных геометрических параметров текстур «Анизотропная» (развитая многомодальная шероховатость) и «Микроканалы» (с шириной

микроканалов 90 мкм, расстоянием между осями микроканалов 180 мкм) на теплопередающих поверхностях теплогенерирующего оборудования, является перспективным подходом для снижения интенсивности шлакования и интенсификации теплообмена. В результате формирования развитой многомодальной шероховатости на теплопередающих поверхностях создаются условия смещения температур образования шлака в область более высоких значений (выше на 60–75 °С по сравнению с немодифицированной сталью 20Х23Н18). Текстура «Анизотропная» способствует уменьшению размера фронта растекания шлака, а текстура «Микроканалы» (с шириной микроканалов 90 мкм, расстоянием между осями микроканалов 180 мкм) уменьшает толщину расплава шлака за счет увеличения его фронта растекания.

4. При модификации теплопередающих поверхностей лазерным излучением, за счет формирования оксидного слоя и текстуры «Микроканалы» (с шириной микроканалов 90 мкм, расстоянием между осями микроканалов 180 мкм) снижается прочность адгезионного контакта продуктов горения органического топлива с поверхностью, что позволяет более эффективно проводить очистку теплопередающих поверхностей от золошлаковых отложений.

**Степень достоверности.** Достоверность полученных в экспериментальных исследованиях результатов обусловлена применением современных средств измерений, методов анализа и обработки опытных данных, а также в ряде примеров хорошим согласованием экспериментальных и теоретических результатов. Оценка достоверности полученных экспериментальных данных проводилась по результатам расчетов погрешностей измерений регистрируемых физических величин.

**Личный вклад автора** состоит в формулировании цели и задач диссертации. Разработке методик экспериментальных исследований и выборе методов измерений. Проведении экспериментов и обработке их результатов, оценке систематических и случайных погрешностей. Анализе результатов экспериментальных исследований и натурных испытаний. В формулировке выводов и основных защищаемых положений диссертационной работы.

Апробации результатов на всероссийских и международных конференциях, подготовка публикаций в журналы, индексируемые в базах Scopus и Web of Science.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных мероприятиях:

1. IX Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», Томск, Россия, 2020 г.;
2. X Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», Томск, Россия, 2021 г.;
3. Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», Томск, Россия, 2022 г.;
4. Научно-практическая конференция работающей молодежи Группы «Интер РАО», Москва, Россия, 2022 г.;
5. XVI Российская конференция (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ (РКТС-16), Махачкала, Россия, 2023 г.;
6. XXIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов имени академика РАН А.И. Леонтьева, посвященная 100-летию академика В.Е. Алемасова «Проблемы газодинамики и тепломассобмена в энергетических установках», Казань, Россия, 2023 г.;
7. VIII Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика», Махачкала, Россия, 2023 г.;
8. III Всероссийская с международным участием молодежная конференция «Бутаковские чтения», Томск, Россия, 2023 г.;
9. XVII Минский международный форум по тепломассообмену, Минск, Белоруссия, 2024 г.

**Публикации.** Основные результаты диссертации изложены в девяти публикациях, три из них статьи, опубликованные в высокорейтинговых

рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных «Web of Science» и «Scopus», входящих в первый квартиль.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи исследований, представлена научная новизна работы и ее практическая и теоретическая значимость, обоснована достоверность полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, и сведения об их апробации.

**В первой главе** обобщены известные знания о процессе испарения капель, расположенных на теплопередающих поверхностях, характеризующихся контрастной смачиваемостью. Также выполнен анализ современного состояния теории и практики в области решения проблемы интенсификации теплообмена в энергогенерирующем оборудовании за счет снижения негативных последствий золошлаковых отложений.

**Во второй главе** приведены результаты экспериментальных исследований процесса испарения капель воды, расположенных на теплопередающих поверхностях из алюминиевого сплава АМг-2, с заданными геометрическими параметрами и приповерхностными свойствами.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований и натурных испытаний по оценке стойкости теплопередающих поверхностей нагрева, модифицированных лазерным излучением, к осаждению продуктов горения твердого топлива и шлакованию.

В заключении сформулированы **основные результаты и выводы**.

# **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ НА ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ И ШЛАКОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ**

## **1.1 Современное состояние теории процесса испарения капель, расположенных на теплонагруженных поверхностях**

В связи с интенсивным развитием микроэлектронных устройств, диодных лазерных установок, атомной промышленности особенно остро в последние несколько десятилетий стоит проблема отвода тепловых потоков высокой плотности от теплонагруженных элементов современных устройств и оборудования. Системы охлаждения могут базироваться на разных технологиях, например, однофазные или двухфазные. Известно [1], что системы охлаждения, базирующиеся на однофазных технологиях неспособны эффективно отводить от теплонагруженного оборудования тепловые потоки, превышающие  $100 \text{ Вт/см}^2$ . Для отвода тепловых потоков высокой плотности наиболее перспективными являются системы охлаждения, базирующиеся на капельном орошении (спреевом охлаждении) [2]. В таких системах теплообмен осуществляется в режимах испарения или кипения теплоносителя. Спреевое охлаждение является наиболее эффективным, позволяет поддерживать равномерное охлаждение поверхности теплообмена большой площади. Эффективность достигается за счет распределения капель теплоносителя малого размера с большим соотношением поверхности к объему [3–5]. Поэтому исследование процессов испарения «лежащих» капель особенно при температурах поверхности, соответствующих кипению теплоносителя, актуально с точки зрения отвода тепловых потоков высокой плотности от теплонагруженного оборудования [6].

Изучение процесса взаимодействия капли теплоносителя с нагретой поверхностью необходимо для понимания механизма теплопередачи в системах спреевого охлаждения. Экспериментальные исследования капли, контактирующей

с нагретой поверхностью, также могут обеспечить понимание механизмов тепло- и массообмена при спреевом охлаждении. Необходимо отметить, что испарение капли теплоносителя – сложный процесс, на который влияют большое число факторов, например, теплофизические свойства жидкости, условия окружающей среды, температура поверхности и ее характеристики [7]. Смачивание и шероховатость поверхности являются ключевыми факторами, влияющими на геометрическую форму и состояние капли (состояния Венцеля [8] или Касси-Бакстера [9]), образование и рост пузырька пара внутри капли, а также на конвективные потоки внутри капли. Супергидрофобные и супергидрофильные поверхности широко используются в современных технологиях для интенсификации теплоотдачи и конденсации [10]. Они характеризуются повышенной устойчивостью к коррозии, загрязнению неорганическими и органическими веществами [11]. Шероховатость и смачиваемость поверхности влияют на характеристики процесса испарения и кипения теплоносителя. При значениях тепловых потоков, превышающих критические, температура возрастает из-за образования слоя пара между поверхностью и теплоносителем, что может привести к аварийному режиму работы устройства [1]. Увеличение критического теплового потока способствует достижению более высоких температур в процессах испарения и кипения [12]. Известно, что характер конвективных потоков в капле различен на гидрофобных и гидрофильных поверхностях [13].

Модификация текстуры поверхности является одним из широко используемых подходов интенсификации теплоотдачи в случае капельного/тонкопленочного испарения или кипения. Изменение свойств смачивания поверхностей оказывает существенное влияние на теплоотдачу, а также на инициирование пузырькового кипения и образование, рост, отрыв и слияние пузырьков пара [14]. Смачивание, в свою очередь, зависит от шероховатости (текстуры) и элементного состава поверхности. На гидрофобных поверхностях инициирование процесса пузырькового кипения происходит раньше, чем на гидрофильных. Поэтому коэффициент теплоотдачи при кипении теплоносителя на гидрофобной поверхности выше, чем на гидрофильной

поверхности при тепловых потоках малой плотности. Однако по мере увеличения теплового потока и роста числа и размеров пузырьков пара на поверхности образуется паровая пленка, что приводит к снижению коэффициента теплоотдачи. Поэтому, несмотря на то, что на гидрофильных поверхностях процесс кипения начинается позже, при тепловых потоках высокой плотности коэффициент теплоотдачи на гидрофильных поверхностях выше, чем на гидрофобных из-за лучшей смачиваемости. По этой причине на гидрофильных поверхностях значения критического теплового потока больше. Следовательно, на практике при тепловых потоках малой плотности целесообразно использовать гидрофобные поверхности, а гидрофильные при тепловых потоках высокой плотности [15,16]. Увеличение коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока может быть достигнуто за счет использования поверхностей, демонстрирующих повышенную частоту и плотность нуклеации. Такими свойствами обладают бифильные поверхности, полученные путем комбинации гидрофильных и гидрофобных участков [17]. Использование таких поверхностей показало хорошие результаты [18]. Комбинация участков с разными свойствами смачивания приводит к значительным изменениям в процессе испарения капли [19]. В процессе теплоотдачи при кипении известны результаты использования бифильных поверхностей с целью получения раннего пузырькового кипения на гидрофобных участках и высокого критического теплового потока на гидрофильных участках [20].

Известны различные подходы создания бифильных поверхностей теплообмена: формированием гидрофобных участков литографией на гидрофильной поверхности [21], маскированием и распылением гидрофобного агента [22], методом испарения-кристаллизации [23]. Лазерные технологии обработки материалов в последнее время привлекают все больше внимания, поскольку характеризуются относительно небольшими финансовыми затратами на осуществление обработки, простотой технологического процесса и высокой производительностью, а также возможностью изменения функциональных свойств поверхности [24,25]. Лазерную обработку металлов можно использовать для

создания бифильных поверхностей теплообмена. Лазерную обработку и силанизацию поверхности нитрида алюминия использовали [20] для получения гидрофильных и супергидрофобных участков бифильной поверхности. Установлено [20], что на бифильных поверхностях разность давлений Лапласа служит движущей силой, вызывающей движение пузырьков в сторону супергидрофобной зоны. В [1], бифильные поверхности созданы на кремниевой пластине с помощью лазерной абляции и силанизации. Установлено, что при тепловом потоке  $16,4 \text{ Вт/см}^2$  мелкие пузырьки пара генерируются только на супергидрофильной области. Кроме того, температура супергидрофобной области выше, чем температура супергидрофильной области, и эта разница температур для теплового потока малой и высокой плотности составляет 25 и 90 °C соответственно. Бифильные поверхности в виде квадратных узоров размером  $2 \times 2 \text{ мм}^2$  с шагом 2 мм на медной трубке созданы с помощью химического осаждения и пикосекундной лазерной системы [17]. Коэффициент теплоотдачи бифильной поверхности с гидрофобными участками увеличивается в 1,16 по сравнению с коэффициентом теплоотдачи однородной полированной медной поверхности, но для супергидрофобных поверхностей при тепловом потоке высокой плотности коэффициент теплоотдачи снижается до 0,83 из-за различной динамики пузырьков, вызванной свойствами смачивания поверхности [17]. Супербифильные поверхности алюминия изготовлены путем сочетания метода химического осаждения и наносекундной лазерной текстуры [14]. Установлено, что для увеличения критического теплового потока и коэффициента теплоотдачи расстояние между гидрофобными участками должно соответствовать диаметру отрыва пузырька [14]. Покрытие из ПДМС-кремнезема наносилось на нержавеющую фольгу для придания гидрофобности, локальная лазерная термообработка покрытия обеспечивала формирование супергидрофильной области [26]. Бифильная поверхность обеспечивала низкую температуру возникновения пузырькового кипения, больший коэффициент теплоотдачи, по сравнению с полированной, гидрофобной и гидрофильной поверхностями [26].

## **1.2 Анализ современного состояния теории и практики в области решения проблемы интенсификации теплообмена в энергогенерирующем оборудовании за счет снижения негативных последствий золошлаковых отложений**

В настоящее время уголь остается наиболее широко используемым топливом для производства электроэнергии во многих странах из-за его распространенности и относительно низкой стоимости. В 2023 году мировая добыча угля достигла самого высокого уровня за всю историю (179 ЭДж), превысив максимум, установленный годом ранее [27]. Крупнейшими потребителями угля являются Китай (56,1 %), Индия (13,4 %), США (5,0 %), Япония (2,8 %), Индонезия (2,6 %), Россия (2,3 %). Мировое потребление угля в 2023 году, согласно отчету Института Энергетики [27], выросло до 164 ЭДж. Рост на 1,6 % по сравнению с 2022 годом был в семь раз выше среднего темпа роста за предыдущие десять лет. Хотя Китай на сегодняшний день является крупнейшим потребителем угля (он побил собственный рекорд, установленный в 2022 году), в 2023 году Индия впервые превысила совокупное потребление Европы и Северной Америки. Нестабильная ситуация в мире вынуждает страны обращаться к доступным ископаемым топливным ресурсам, позволяющим стабильно вырабатывать энергию для электро- и теплоснабжения. [28–30]. Согласно статистике [29], для большинства стран таким топливом является уголь. Сжигание угольного топлива в котельных агрегатах сопряжено с актуальными, нерешенными в настоящее время проблемами – отложение золы, шлакование, низкотемпературная коррозия поверхностей теплообмена, относительно низкая эффективность котлов, работающих на угле [31,32]. Вышеперечисленные проблемы взаимосвязаны и обусловлены составом угля (его зольностью) по сравнению с газовым или жидким углеводородным топливом.

Зола, образующаяся при сжигании топлива, находится в топочном пространстве. В ядре факела температура достигает 1300 – 1700 °С, её значения превышают температуры начала размягчения и плавления золы. Шлак

формируется из золы преимущественно в камерных топках при сжигании угольной пыли. Если температура на выходе из топки не превышает 1000 – 1150 °С, то происходит процесс кристаллизации расплава золы, содержащейся в продуктах горения. Частицы золы и шлака осаждаются в шлаковом бункере. Если температура на выходе из топки более 1150 °С, то зола, содержащаяся в продуктах горения, в размягченном или жидком виде осаждается на полурadiационные и конвективные поверхности нагрева, формируя отложения золы или шлак [33,34]. Вследствие уменьшения расстояния между трубами полурadiационных и конвективных поверхностей нагрева увеличивается термическое сопротивление, уменьшаются тяга и избыток воздуха в топке. Последнее интенсифицирует процесс отложения золы или шлакования, нарушая номинальный режим работы котла. Как следствие понижается паропроизводительность, повышается температура перегретого пара. Зола и шлак на трубах полурadiационных и конвективных поверхностей нагрева формируется неравномерно, что приводит не только к вышеперечисленным проблемам, но и к формированию температурного градиента. Последнее является причиной неравномерного нагрева труб пароперегревателя и их “прогару” (разрушению).

Опасность шлакования тем больше, чем выше зольность, и чем ниже температура плавления золы. Применение угля с постоянным составом низкой зольности уменьшает отложения золы в топке котла. Но последнее не всегда реализуемо.

Проблема шлакования приобретает крайне высокую значимость при вовлечении в технологический цикл неконвенциональных или непроектных топлив [35]. Это обуславливается тем, что такие топлива могут быть существенно неоднородны по составу и содержать много минеральных примесей с низкой температурой плавления [35–37] и высокую концентрацию щелочных и щелочноземельных металлов, снижающих температуру плавления золы [38]. Кроме того, нормативные условия сжигания в существующих или модернизированных установках могут интенсифицировать плавление золы и загрязнение поверхностей нагрева. С учетом того, что в ближайшие годы объемы

энергетической конверсии низкосортных топлив, углей, биомассы и различных отходов будут возрастать [39,40], разработка новых подходов для эффективной борьбы со шлакованием котлов становится все актуальнее.

Шлаковые отложения могут быть удалены из котла во время технического обслуживания с применением зарекомендованных подходов (паровая обдувка, детонационная, акустическая и гидроструйная очистка). Однако все мероприятия по очистке котла являются очень дорогими и могут иметь низкую эффективность, особенно в труднодоступных участках топки.

Поэтому целесообразно применять меры для снижения интенсивности шлакования котла непосредственно во время его работы.

Суть известных подходов [41,42] к снижению отложения золы и шлакования полурадационных и конвективных поверхностей нагрева заключается: 1) на этапе проектирования топок котлов – в разработке конструктивных решений, обеспечивающих температуру на выходе из топки не более 1150 °С; 2) на этапе эксплуатации – в применении мероприятий по регулировке режимов работы котлов. К таким мероприятиям относятся: повышение избытка воздуха в топке, изменение тонины помола, регулирование положения факела в топке, перераспределение топлива по ярусам горелок. Также на этапе эксплуатации, одними из базовых подходов является модификация топлива различными добавками, совместное сжигание компонентов [35] и предварительная обработка топлива [43]. Например, Хан и др. [43] установили, что совместное сжигание древесной биомассы с высококальциевым углем снижает показатель шлакообразования на 17 – 65 % по сравнению с расчетным значением, не учитывающим взаимодействие компонентов. Кальций снижает содержание легкоплавких частиц в золе, что ослабляет агломерацию и спекание минеральных частиц [43]. Чжан и др. [36] также экспериментально подтвердили положительное влияние добавки 5 % СаО на характеристики плавления золы при совместном сжигании отработанных катодных углеродных блоков и низкосортного угля. Хариана и др. [44] исследовали эффективность использования минеральных добавок (Si–Al, Al и Mg) при сжигании низкосортных высокощелочных углей для

снижения шлакования. Результаты показали [44], что использование 1 % минеральной добавки может существенно снизить шлаковую способность угля. Вуталуру [45] изучил влияние влажной обработки бурого угля раствором лактата алюминия, а также использования минеральных добавок на шлакование. Исследование показало эффективность двух методов. Было выявлено [45], что обработка раствором способствует меньшему осаждению золы на поверхности котла, а использование каолина позволяет улавливать натрий.

Несмотря на достаточно высокую эффективность методов модификации состава и обработки топлив для снижения шлакования, во многих случаях этих мер недостаточно. Для обеспечения длительной работы котла без вынужденных остановов на шлакоочистку рациональным является модификация свойств металлических поверхностей внутри топки. Согласно Кумар и др. [46], эта концепция является одной из самых перспективных для решения проблем, связанных со шлакованием. Методы повышения устойчивости металлов к шлакованию включают термообработку, нанесение покрытий, легирование [46,47]. Кроме того, одним из малоизученных и перспективных направлений является лазерная обработка поверхности материалов [48].

В диссертационной работе предложен подход по снижению шлакования полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева, не требующий разработку конструктивных решений на этапе проектирования топок котлов или применения особых мероприятий на этапе эксплуатации. Суть нового подхода заключается в формировании приповерхностного слоя, обеспечивающего снижение прочности адгезионного контакта золошлаковых отложений с теплопередающей поверхностью нагрева энергогенерирующего оборудования. Подход основан на модификации теплопередающих поверхностей лазерным излучением наносекундной длительности.

Лазерная модификация [48] конструкционных материалов подразумевает создание на поверхностях металлов заданных текстур в виде микроканалов, микростолбиков, многомодальную разноуровневую от микро- до наномасштаба шероховатость. После лазерной модификации поверхности происходит ее сильное

окисление, что, в свою очередь, может снижать адгезию расплавленных минералов. При лазерном текстурировании происходит инверсия свойств смачивания поверхностей вплоть до экстремальных состояний (супергидрофильности) [49]. Модификация поверхности металлов может стать эффективным инструментом для управления характеристиками взаимодействия с частицами минерального расплава.

Известно, что прилипание частиц золы к поверхности в основном зависит от свойств частиц и поверхности [50]. Суман и др. [51] анализировали влияние скорости удара минеральных микрочастиц и шероховатости поверхности на адгезию. Показано [51], что шероховатость поверхности доминировала при более низких скоростях удара (до 35 м/с), тогда как при более высоких скоростях влияние шероховатости поверхности на адгезию было незначительным. Ци и др. [52] анализировали характеристики смачивания керамической и алюминиевой поверхности расплавом свинца при различной шероховатости подложки. Установлено, что при увеличении шероховатости поверхности с 0,09 до 2,23 мкм свободная энергия поверхности постепенно увеличивалась от 13,356 до 39,998 мДж/м<sup>2</sup> [52]. Диаметр контакта капель свинца уменьшился с 9,11 до 7,19 мм [52].

Несмотря на значительное влияние модификации поверхности материала на адгезию твердых частиц [50,51] и взаимодействие с металлическими расплавами [52,53], ранее она не исследовалась в контексте шлакования.

Настоящее исследование рассматривает новый ранее не изученный подход к снижению негативных последствий шлакования поверхностей нагрева (полурadiaционных и конвективных) топок котлов, основанный на лазерном текстурировании и химическом модифицировании приповерхностного слоя металлов. Этот подход позволяет сместить температурный уровень формирования расплава минеральных веществ (шлака) при сжигании органических топлив в область более высоких температур, уменьшить размер участков поверхности покрытия шлаковыми отложениями, а также значительно снизить толщину формируемых шлаковых отложений.

Выявленные в исследовании тенденции, установленные количественные характеристики и сформулированные рекомендации будут полезны в сфере проектирования котлов разных типов и модернизации существующих установок. Полученные новые знания о лазерной модификации являются научной основой для прикладных технологий, направленных на повышение срока службы котельного оборудования и профилактики шлакования.

### **Выводы по главе 1**

Интенсивное развитие микроэлектронных устройств в высокотехнологичных отраслях промышленности невозможно без решения актуальной проблемы – отвода тепловых потоков высокой плотности от теплонагруженных элементов. Системы охлаждения на базе систем орошения в которых отвод теплоты осуществляется за счет испарения капель теплоносителя, расположенных на поверхности теплообмена, являются наиболее перспективными системами охлаждения, потенциально способными отводить тепловые потоки до  $1000 \text{ Вт/см}^2$ . Но для широкого практического их использования необходимо решить актуальные задачи в области теплофизики, связанные с интенсификацией процессов испарения капель теплоносителей, в управлении и контроле режимов испарения капель, их транспорту и локализации в теплонагруженной области поверхности.

Из известных подходов к решению вышеобозначенных задач формирование специального вида текстуры и заданных свойств смачивания позволяют достичь наиболее значимых результатов. За счет создания специального вида микротекстуры и развитой многомодальной шероховатости при испарении капли теплоносителя при прочих равных условиях можно увеличить скорость испарения более чем в 2,5 раза [54], а отвод теплоты в 2 раза [55], в сравнении с аналогичными характеристиками, установленными при испарении капли на поверхности теплообмена с текстурой, сформированной традиционными подходами – шлифовкой и полировкой абразивными материалами [3].

В качестве конструкционного материала для изготовления поверхностей теплообмена, как правило, используются сталь, медь и алюминиевые сплавы. Смачивание таких материалов характеризуется гидрофильными свойствами преимущественно со значениями контактного угла около 70–89 градусов. Известно [56], что на супергидрофильных поверхностях металлов кризис теплообмена (эффект Лейденфроста) смещается в область более высоких температур для алюминия до 110 °С, для нержавеющей стали до 45°С [57], в сравнении с поверхностями металлов, характеризующиеся гидрофильными свойствами смачивания. Но стабильных центров зарождения паровых пузырей больше на супергидрофобных поверхностях теплообмена. С точки зрения интенсификации процессов испарения капель теплоносителя, а также при решении задачи локализации капли в теплонагруженной области поверхности наиболее перспективными являются поверхности комбинирующие участки супергидрофильности/супергидрофобности (поверхности с бифильными свойствами смачивания). Но известных результатов по испарению капель теплоносителей на таких поверхностях в настоящее время недостаточно для прогностической оценки влияния бифильных свойств смачивания на характеристики процесса испарения капли.

Также актуальной задачей в области теплофизики является задача по оценке охлаждения приповерхностного слоя на заданной толщине теплопередающей поверхности. Традиционно оценка влияния приповерхностных свойств на степень охлаждения поверхностей теплообмена за счет испарения капли теплоносителя проводилась с использованием инфракрасных камер или установкой термопары под поверхностью теплообмена. Но такая оценка имеет существенные недостатки, связанные с тем, что инфракрасная камера даже с учетом введения корректирующих данных позволяет лишь с грубой погрешностью оценить охлаждение поверхности, но не глубинных её слоев. Термопары, установленные на поверхности или под теплообменной поверхностью, регистрируют усредненные данные контактирующих со спаем сред (поверхности и нагревательного элемента,

поверхности и окружающей среды). Последнее часто приводит к неадекватным экспериментальным данным.

С точки зрения интенсификации процесса испарения капли, и соответственно, с точки зрения отвода теплоты от теплонагруженной поверхности особый интерес вызывают процессы, реализующиеся на завешающей стадии испарения капли. Известно [58], что при определенных условиях скорость испарения капли существенно возрастает до 5 раз [58] на завешающей стадии испарения. Последнее безусловно влияет на отвод теплоты от теплонагруженной поверхности (её охлаждение). Известные результаты в настоящее время лишь свидетельствуют о росте скорости испарения на завершающей стадии испарения. Последнее нельзя обосновать только прогревом капли до температур соответствующих теплонагруженной поверхности и уменьшением начального объема капли.

В настоящее время актуальными проблемами в области теплофизики остаются проблемы, связанные с интенсификацией процессов теплообмена, с обеспечением регламентного температурного режима работы теплонагруженного оборудования, с отводом тепловых потоков высокой плотности от энергонасыщенного оборудования. Если рассматривать устройства систем охлаждения или энергогенерирующее оборудование, то поиск решений вышеобозначенных проблем, при исследовании процессов испарения и кипения теплоносителей, ведется преимущественно в контуре стенки теплообмена и охлаждающего теплоносителя. В энергогенерирующем оборудовании, помимо вышеобозначенных проблем, в условиях сжигания угольного топлива в котельных агрегатах не решенными и актуальными проблемами являются отложение золы, шлакование, низкотемпературная коррозия поверхностей теплообмена. Последние реализуются в контуре стенки теплообмена и греющей технологической среды (дымовых газов). В мировой практике существуют разные методы борьбы с негативными последствиями золошлаковых отложений, но наиболее широко известные, как правило, сводятся к изменению состава топлива путем добавления реагентов, которые снижают теплоту сгорания топлива. Также известны подходы

к снижению отложения золы и шлакования полурadiационных и конвективных поверхностей нагрева суть которых заключается: 1) на этапе проектирования топок котлов – в разработке конструктивных решений, обеспечивающих температуру на выходе из топки не более 1150 °С (при температурах нагрева более 1150 °С из золы формируется шлак); 2) на этапе эксплуатации – в применении мероприятий по регулировке режимов работы котлов. К таким мероприятиям относятся: повышение избытка воздуха в топке, изменение тонины помола, регулирование положения факела в топке, перераспределение топлива по ярусам горелок. Практика показывает, что известные методы и мероприятия по предупреждению шлакования изменяют номинальный режим работы котла, снижают эффективность. Перспективным, новым подходом к решению проблем золошлаковых отложений является модификация приповерхностного слоя металлов [45]. Известные [45,46] методы повышения устойчивости металлов к шлакованию включают термообработку, нанесение покрытий и легирование. Лазерная обработка поверхностей металлов является малоизученным направлением в области решения задач золошлаковых отложений [47]. Но неоспоримым фактом является то, что для решения актуальных задач в области теплофизики лазерные технологии модификации поверхностей металлов имеют существенные преимущества, по сравнению с любыми другими технологиями модификации приповерхностных свойств металлов.

## **ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В УСЛОВИЯХ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЗАДААННЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ И ПРИПОВЕРХНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

В главе приведено описание разработанной экспериментальной установки по исследованию процессов теплообмена в условиях испарения капли теплоносителя, расположенной на теплопередающей модифицированной поверхности. Процесс испарения капель исследовался методами: тeneвым с оборудованием высокоскоростной регистрации быстропротекающих процессов и micro PIV (Particle Image Velocimetry). Анализ текстуры проводился методом электронной микроскопии. Геометрические параметры теплопередающих поверхностей (трехмерные параметры шероховатости) определены методом конфокальной микроскопии.

Приведено описание разработанного подхода, основанного на методе контактных измерений температуры, к определению охлаждения приповерхностного слоя на заданной толщине за счет испарения капли воды заданным объемом.

Приведены результаты экспериментальных исследований процессов теплообмена в условиях испарения капли теплоносителя, расположенной на поверхности из алюминиевого сплава, модифицированной лазерным излучением.

## 2.1 Материалы, оборудование и методы исследования

### 2.1.1 Создание поверхностей с заданными геометрическими параметрами и приповерхностными свойствами

Исследования проводились на поверхностях из алюминиевого сплава АМг-2 размерами 30,0×30,0×2,0 мм. Сплав АМг-2 широко используется в качестве конструкционного материала при изготовлении поверхностей теплообмена.

В экспериментальных исследованиях [59] использовалось пять групп поверхностей, различающихся свойствами смачивания. В таблице 2.1 приведены условные обозначения и характеристики поверхностей, используемых в экспериментальных исследованиях.

Таблица 2.1 – Свойства смачивания и условные обозначения поверхностей

| Группа поверх-ности | Свойства смачивания                                   | Условное обозначение | $\theta_0, ^\circ$                           | Примечание                                         |
|---------------------|-------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| I                   | гидрофильные                                          | Polished             | $87,8^\circ \pm 5,2^\circ$                   | —                                                  |
| II                  | супергидрофильные                                     | SHPhi                | $\approx 0$                                  | —                                                  |
| III                 | супергидрофобные                                      | SHPho                | $152,5^\circ \pm 6,2^\circ$                  | —                                                  |
| IV                  | бифильные<br>(супергидрофобные/<br>супергидрофильные) | BiPhi1               | $152,5^\circ \pm 6,7^\circ / \approx 0$      | одно<br>супергидрофильное<br>кольцо                |
|                     |                                                       | BiPhi2               | $152,5^\circ \pm 6,9^\circ / \approx 0$      | три концентрических<br>супергидрофильных<br>кольца |
| V                   | бифильные<br>(гидрофильные/<br>супергидрофильные)     | BiPhi3               | $87,8^\circ \pm 5,2^\circ / \approx 0^\circ$ | одно<br>супергидрофильное<br>кольцо                |
|                     |                                                       | BiPhi4               | $87,8^\circ \pm 5,2^\circ / \approx 0^\circ$ | три концентрических<br>супергидрофильных<br>кольца |

Поверхности I группы использовались в качестве референтных поверхностей сплава АМг-2 (далее Polished). Их текстура не модифицировалась,

характеризовалась гидрофильными свойствами ( $\theta_0 = 87,8^\circ$ ) и матовым блеском после полировки заводом изготовителем. Перед проведением экспериментов поверхности первой группы очищались в ультразвуковой ванне последовательно в изопропиловом спирте и ультрачистой воде при температуре  $22 - 25^\circ\text{C}$  продолжительностью по 5 минут в каждой среде. Далее сушились в естественных условиях, соответствующих лабораторным, в течение не менее 24 часов. Поверхности групп II, III, IV и V модифицировались лазерным излучением с целью формирования разноразмерной (многомодальной) развитой текстуры (шероховатости), оцениваемой трехмерными параметрами шероховатости. Поверхности групп II, III, IV и V отличаются свойствами смачивания.

Поверхности II группы (далее SHPhi), характеризуются супергидрофильными свойствами ( $\theta_0 \approx 0$ ), изготовлены по хорошо апробированной методике [57] путем обработки поверхностей лазерным излучением наносекундной длительности. Суть подхода гидрофилизации при обработке поверхностей АМг-2 лазерным излучением наносекундной длительности заключается в увеличении поверхностной энергии за счет формирования оксидов (полярных соединений) в приповерхностном модифицированном слое, а также в образовании многомодальной развитой текстуры (шероховатости) за счет процессов плавления и абляции материала [60–62]. Модификация поверхностей АМг-2 осуществлялась с помощью системы на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера (IPG Photonics, Россия) в воздушной среде при температуре  $20 - 22^\circ\text{C}$ , атмосферном давлении, относительной влажности  $43 - 48\%$ . На основе ранее проведенных исследований [57], выбраны параметры лазерного излучения, обеспечивающие формирование многомодальной текстуры (шероховатости): выходная мощность лазера 50 Вт, длительность излучения 120 нс, частота 20 кГц, энергия в импульсе 0,921 мДж. Скорость линейного перемещения луча лазера и число линий прохода луча приняты  $191\text{ мм/с}$  и  $105\text{ мм}^{-1}$ , соответственно. После лазерной модификации поверхности подвергались очистке в ультразвуковой ванне последовательно в

изопропиловом спирте и дистиллированной воде продолжительностью по 5 минут с целью удаления незакрепленных с поверхностью продуктов абляции.

Поверхности III группы (далее SHPho), характеризуются супергидрофобными свойствами ( $\theta_0 = 152,5^\circ$ ), изготовлены по хорошо апробированной методике [63] путем обработки поверхностей лазерным излучением и проведением последующей процедуры низкотемпературного отжига. Суть подхода гидрофобизации заключается в формировании лазерным излучением многомодальной текстуры и последующем снижении поверхностной энергии путем интенсификации процесса адсорбции углеводородных соединений (неполярных соединений) из окружающей среды [64,65] процедурой низкотемпературного отжига (старения). Методика формирования заданной многомодальной текстуры идентична методике, используемой и описанной выше, при изготовлении поверхностей II группы. Процедура низкотемпературного отжига (старение) поверхностей, модифицированных лазерным излучением, проводилась в воздушной среде при температуре 100 °C в течение 24 часов [66] с использованием муфельной печи.

Поверхности IV и V групп являются бифильными поверхностями. На рисунке 2.1 приведена схема расположения и конфигурация участков с различными свойствами смачивания на поверхностях IV и V групп.

Поверхности IV группы изготовлены с использованием поверхностей, характеризующихся супергидрофобными свойствами (III группы  $\theta_0 = 152,5^\circ$ ) путем формирования на их поверхности участков с супергидрофильными свойствами ( $\theta_0 \approx 0$ ). Супергидрофобные поверхности изготовлены по выше описанной методике. Супергидрофильные участки шириной  $\approx 160$  мкм (на рисунке 2.1 обозначены синим цветом) формировались на супергидрофобной поверхности лазерным излучением по хорошо апробированной графо-аналитической методике [67], базирующейся на использовании геометрических размеров абляционного кратера. Характеристики лазерного излучения при создании супергидрофильных участков соответствовали характеристикам, применяемым при формировании текстуры поверхностей II группы. Изготовлено две серии бифильных поверхностей

IV группы с одним супергидрофильным кольцом и с тремя concentрическими супергидрофильными кольцами. Поверхности IV группы с одним супергидрофильным кольцом названы BiPhi1, с тремя – BiPhi2. Суть подхода формирования бифильных поверхностей IV группы заключалась в разрушении углеводородных соединений на супергидрофобной части поверхности путем нагрева локальных участков до температуры выше 300 °С лазерным лучом, движущимся по заданной траектории (окружности).

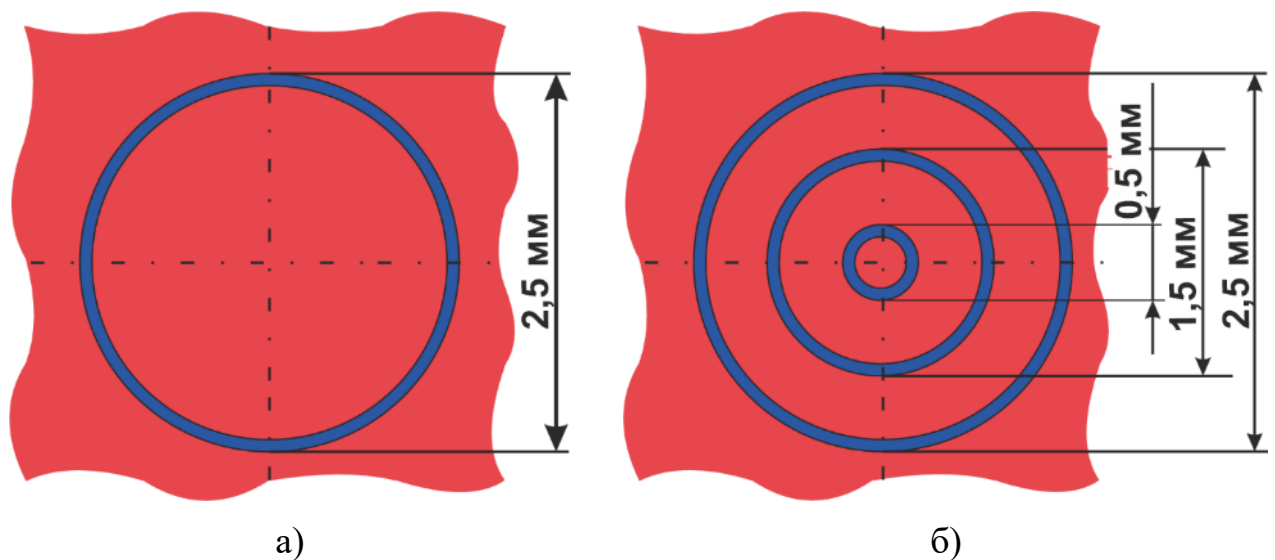


Рисунок 2.1 – Схема конфигурации и расположение супергидрофильных участков на бифильных поверхностях IV и V групп: а) одно супергидрофильное кольцо; б) три concentрических супергидрофильных кольца. Красным цветом обозначены участки с супергидрофобными свойствами ( $\theta_0 = 152,5^\circ$ ) IV группы / с гидрофильными свойствами ( $\theta_0 = 87,8^\circ$ ) V группы. Синим цветом обозначены участки с супергидрофильными свойствами ( $\theta_0 \approx 0$ )

Бифильные поверхности V группы изготовлены путем формирования на полированной поверхности I группы ( $\theta_0 = 87,8^\circ$ ) супергидрофильных участков ( $\theta_0 \approx 0$ ) в виде одного или трех concentрических колец аналогично бифильным поверхностям IV группы (рисунок 2.1). Характеристики лазерного излучения при создании супергидрофильных участков соответствовали характеристикам, применяемым при формировании текстуры поверхностей II группы. Таким образом, конфигурация, расположение и характеристики лазерного излучения при

формировании супергидрофильных участков на бифильных поверхностях IV группы и V групп в экспериментальных исследованиях идентичны. Различие состоит в том, что поверхности IV группы содержат участки супергидрофобности ( $\theta_0 = 152,5^\circ$ ) и супергидрофильности ( $\theta_0 \approx 0$ ), а поверхности V группы содержат участки гидрофильности ( $\theta_0 = 87,8^\circ$ ) и супергидрофильности ( $\theta_0 \approx 0$ ) (таблица 2.1). Поверхности V группы с одним кольцом названы BiPhi3, с тремя – BiPhi4.

Выбранная конфигурация бифильных поверхностей обусловлена несколькими факторами, выявленными по результатам проведенных предварительных экспериментов. Во-первых, при размещении капли воды на бифильную поверхность с конфигурацией в виде супергидрофильных колец (рисунок 2.1), линия трехфазного контакта пиннигуется по периметру супергидрофильного кольца. При этом капля приобретает форму сегмента сферы. Последнее позволяет уменьшить погрешность определения убыли объема испаряющейся капли при обработке теневых фотоизображений методами гониометрии. Во-вторых, установлено, что конфигурация супергидрофильных участков в виде колец позволяет с высокой точностью контролировать расположение на поверхности капель объемом 5 мкл, площадь межфазной поверхности «вода/поверхность нагрева» и диаметр капли, а, следовательно, и площадь межфазной поверхности «вода/воздух». Последнее в системах охлаждения, базирующихся на капельном орошении, является решением фундаментальных проблем, связанных с контролем расположения капель и их геометрических характеристик на охлаждаемых технологических поверхностях.

### **2.1.2 Анализ геометрических параметров поверхностей**

Анализ геометрических параметров поверхности проводился методом электронной микроскопии по фотоизображениям высокого разрешения, полученных с помощью сканирующего микроскопа (Tescan Mira 3, Чехия).

Трехмерные параметры шероховатости текстуры определены методом конфокальной микроскопии с использованием лазерного сканирующего

микроскопа Olympus Lext OLS4100 (Olympus NDT, Япония) с разрешением 120 нм в плоскости XY и 10 нм по оси Z. Полученные изображения поверхностей обрабатывались в программном комплексе Lext OLS4100. Измерение проводилось объективом 50X, в поле измерения размером 259×259 мкм в соответствии со стандартами ISO 25178 и ISO 4288. При определении трехмерных параметров 8 %.

### **2.1.3 Экспериментальная установка по исследованию процесса испарения капли теплоносителя**

На рисунке 2.2 представлена установка по исследованию свойств смачивания поверхностей АМг-2 и процесса испарения капель воды. Капля 1 дистиллированной деаэрированной воды помещалась одноканальным высокоточным электронным дозатором 2 (Thermo Fisher Scientific, США) на поверхность образца 3. Исследуемые процессы регистрировались теневым оптическим методом с использованием оборудования высокоскоростной видеорегистрации быстропротекающих процессов в составе видеокамеры 4 Phantom Miro M310 (Vision Research, США) с микрообъективом Nikon AF micro Nikkor 200 mm 1:4 D. Видеозапись исследуемых процессов осуществлялась при следующих характеристиках: разрешение  $512 \times 384$  пикселей, скорость съемки 100 кадров в секунду. Плоскопараллельный свет генерировался с помощью источника света 5 (Edmund optics, США) и телецентрической оптической трубы 6 (Edmund optics, США).

Верхняя оптическая система использовалась с целью контроля геометрических характеристик капель, а также регистрации процессов зарождения, роста и разрушения пузырей. Состоит из фотоаппарата 7 Nikon D 7100 (Nikon, Япония), 2x F-mount адаптера 8 (Navitar, США), 6,5X увеличительной трубы 9 (Navitar, США), делителя пучка 10 (Navitar, США) с дихроичным зеркалом (Navitar, США) для освещения капли, 4X объектива 11 (Navitar, США).

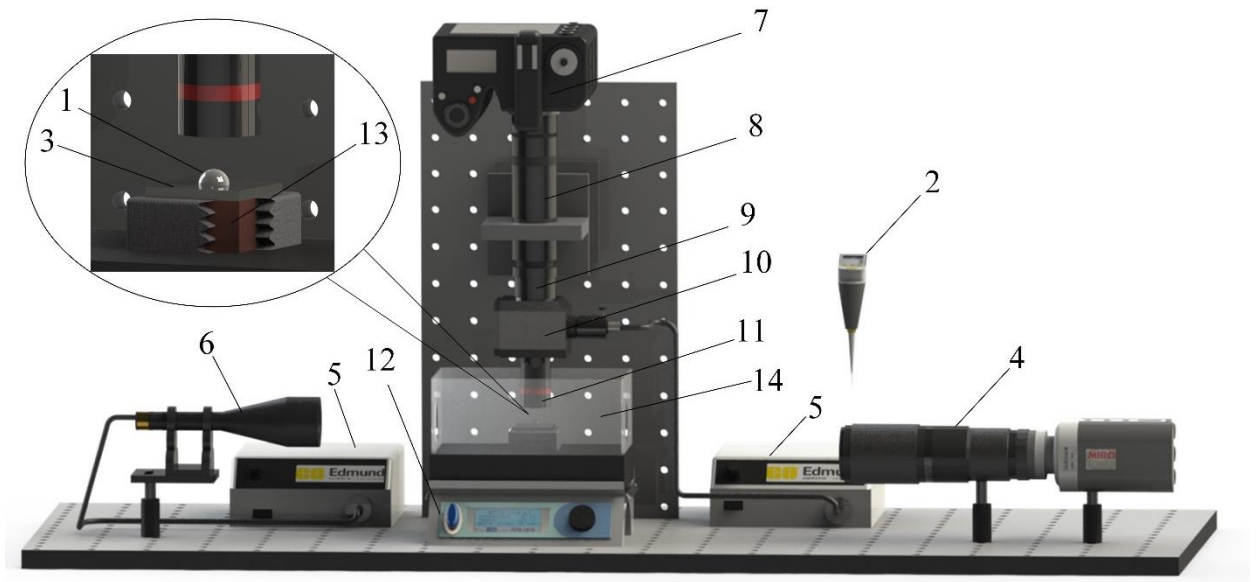


Рисунок 2.2 – Экспериментальная установка по исследованию процесса испарения капли теплоносителя: 1 – капля; 2 – электронный дозатор; 3 – поверхность; 4 – высокоскоростная видеокамера; 5 – источник света; 6 – телецентрическая оптическая труба; 7 – фотоаппарат; 8 – F-mount адаптер; 9 – 6,5X увеличительная труба; 10 – делитель пучка; 11 – 4х объектив; 12 – стеклокерамическая плита; 13 – медный параллелепипед; 14 – бокс

Нагрев поверхностей АМг-2 3 до заданной температуры ( $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) осуществлялся кондуктивным подводом теплоты от источника, состоящего из стеклокерамической плиты 12 (Томь Аналит, Россия) и расположенного на ней медного параллелепипеда 13 размерами  $30,0 \times 30,0 \times 50,0$  мм. Параллелепипед теплоизолирован вспененным каучуком. С целью исключения неконтролируемого влияния конвективных воздушных потоков на процесс испарения капли использовался бокс 14.

Более детально расположение поверхности и медного параллелепипеда на стеклокерамической плите представлено на рисунке 2.3. С целью исключения воздушных зазоров и улучшения теплового контакта между поверхностью АМг-2 и медным параллелепипедом, а также между медным параллелепипедом и стеклокерамической плитой наносилась высокотемпературная термопаста (GRIPCOTT, Франция) (рисунок 2.3).

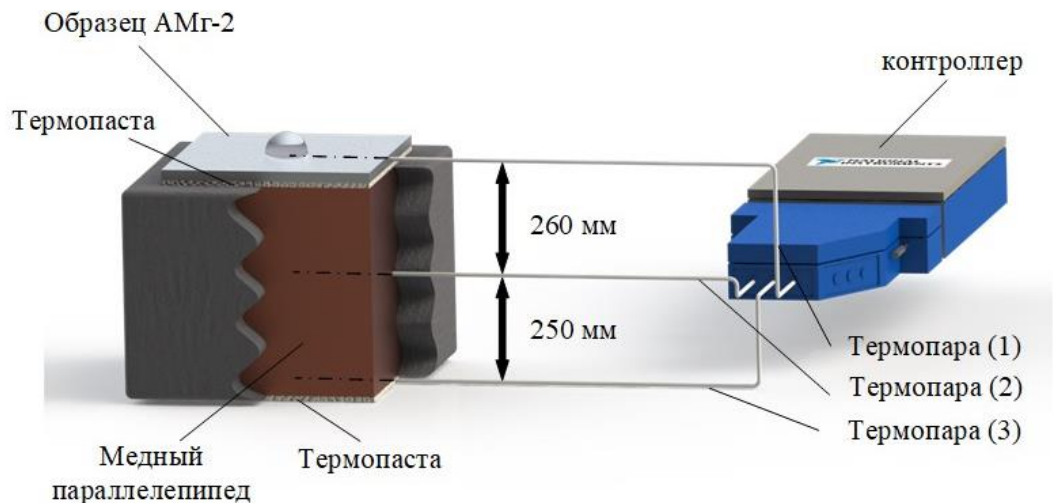


Рисунок 2.3 – Система регистрации температур

Контроль температуры нагрева осуществлялся высокоточной малоинерционной системой, состоящей из термопар (рисунок 2.3) типа К хромель-алюмель (диаметр 0,08 мм, изоляция PFA, значение допуска 0,4 %; Omega, США) и контролера (National Instruments, США). Погрешность измерения температуры не превышала  $\pm 0,1$  °C. Термопары расположены в отверстиях, заполненных высокотемпературной термопастой (GRIPCOTT, Франция).

#### 2.1.4 Методы и методики определения свойств смачивания

Свойства смачивания определялись по значению статического контактного угла ( $\theta_0$ ) и угла скатывания ( $\theta_{\text{roll}}$ ) с использованием оборудования теневого оптического метода (рисунок 2.2). Статические контактные углы измерены в условиях дозирования на поверхность каплей дистиллированной воды объемом 5 мкл с погрешностью  $\pm 0,01$  мкл. Угол скатывания определялся через наименьший угол наклона поверхности для скатывания с нее капли. Капля объемом 5 мкл помещалась на поверхность, закрепленную на гониометре GNL18/M (THORLABS, США), после чего поверхность наклонялась. Угол скатывания регистрировался в момент начала движения капли. Полученные теневые изображения капли воды на горизонтальной (при определении  $\theta_0$ ) и наклонной (при определении  $\theta_{\text{roll}}$ )

поверхности обрабатывались методом гониометрии LB-ADSA [68]. Погрешность определения статического контактного угла и угла скатывания не превышала 5 %.

### **2.1.5 Методы и методики определения характеристик процесса испарения капли**

Объём капли 5 мкл при исследовании процесса испарения соответствовал типичному объёму капель, генерируемых системами охлаждения, базирующиеся на капельном орошении [2]. Выбор температуры нагрева образца 100 °C обусловлен тем, что данная температура является началом фазового перехода самого распространённого теплоносителя (воды) для современных активных систем спреевого охлаждения, базирующихся на потенциале фазового перехода [3].

Геометрические размеры испаряющейся капли (объем ( $V$ ), контактный диаметр ( $d$ ), площадь межфазной поверхности капли «вода/воздух» ( $S_{lg}$ ), контактный угол ( $\theta$ )) определялись по видеозаписям, полученным теневой оптической системой. Полученные после раскадровки теневые изображения обрабатывались методом гониометрии LB-ADSA [68] (рисунок 2.4а). Случайная погрешность экспериментального определения контактного угла и диаметра капли в условиях её испарения не превышала 5 %, объема и площади – 10 %.

Исследование процессов зарождения, роста и разрушения пузырей в капле осуществлялось с помощью оборудования верхней оптической системы. Обработка видеозаписей верхней оптической системы выполнялась в следующей последовательности. По масштабному коэффициенту определялось изменение диаметра паровых пузырей ( $d_b$ ) от момента зарождения до разрушения, а также их число ( $N$ ) за выбранный промежуток времени ( $\tau$ ) (рисунок 2.4б).

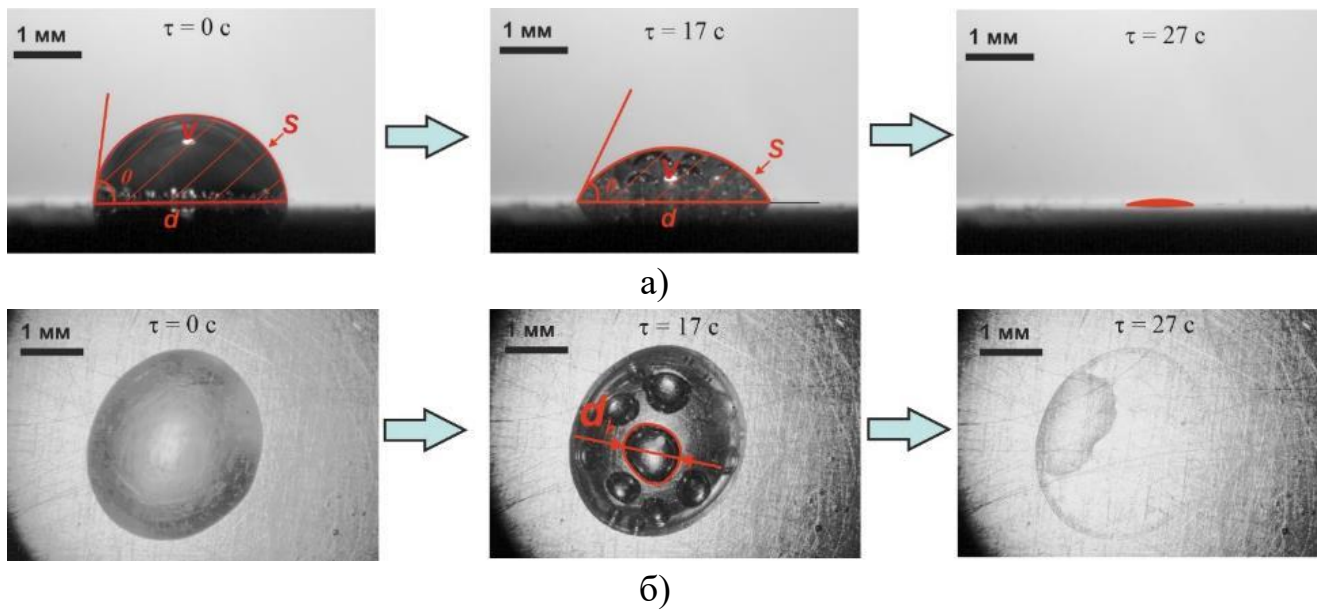


Рисунок 2.4 – Типичные кадры с иллюстрацией процессов обработки видеозаписей: а) теневое изображение испаряющейся капли (определение объема, площадь межфазной поверхности, контактного угла и диаметра, времени испарения); б) фотоизображение верхней оптической системы (определение размеров пузырей, частоты образования, времени до их разрушения)

Удельная скорость испарения определялась по уравнению [58]:

$$W = \frac{\rho \cdot (V_i - V_{i+1})}{\Delta \tau \cdot (S_i + S_{i+1}) / 2}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (2.1)$$

где  $\Delta \tau = \tau_{i+1} - \tau_i$  – разница между текущим и следующим моментом времени, с;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta V = V_i - V_{i+1}$  – разница между объемами капли в момент времени  $\tau_i$  и  $\tau_{i+1}$ , соответственно, м<sup>3</sup>;

$S_i, S_{i+1}$  – площади межфазных поверхностей капли «вода/воздух» в момент времени  $\tau_i$  и  $\tau_{i+1}$ , м<sup>2</sup>.

Погрешность определения удельной скорости испарения не превышает 10 %.

Определение скорости конвективных потоков в испаряющейся капле осуществлялось по хорошо апробированной методике micro-PIV [69,70], с использованием установки приведенной на рисунке 2.2 при замене в верхней оптической системе фотоаппарата 7 Nikon D7100 на высокоскоростную камеру

Phantom Miro M310, а также при замене источника плоскопараллельного света (Edmund optics, США) 5 на непрерывный DPSS лазер серии KLM-532 А (длина волны – 532 нм, номинальная мощность – 74, частота импульсов – не более 15 Гц). Фокусировка изображения камеры Phantom Miro M310 осуществлялась специализированной микроподвижкой с точностью перемещения 5 мкм. Эксперименты проведены в идентичных, хорошо воспроизводимых условиях, соответствующих условиям экспериментов, проводимых с верхней оптической системой до ее модернизации оборудованием micro-PIV. Для реализации Micro-PIV метода в каплю воды добавлялись трассеры: частицы Fluoro-Max Red Fluorescent Polymer Microspheres 1 % об. (ThermoFisher Scientific, США) в концентрации 0,002 % об. Полученные фотоизображения в результате раскадровки видеозаписей обрабатывались по хорошо апробированной методике [69,70] в программном обеспечении Actual Flow (PIV Kit). Типичные кадры, демонстрирующие поля скоростей, представлены на рисунке 2.5. Максимальная погрешность определения средней скорости в измеряемом сечении капли не превышает 6 %.

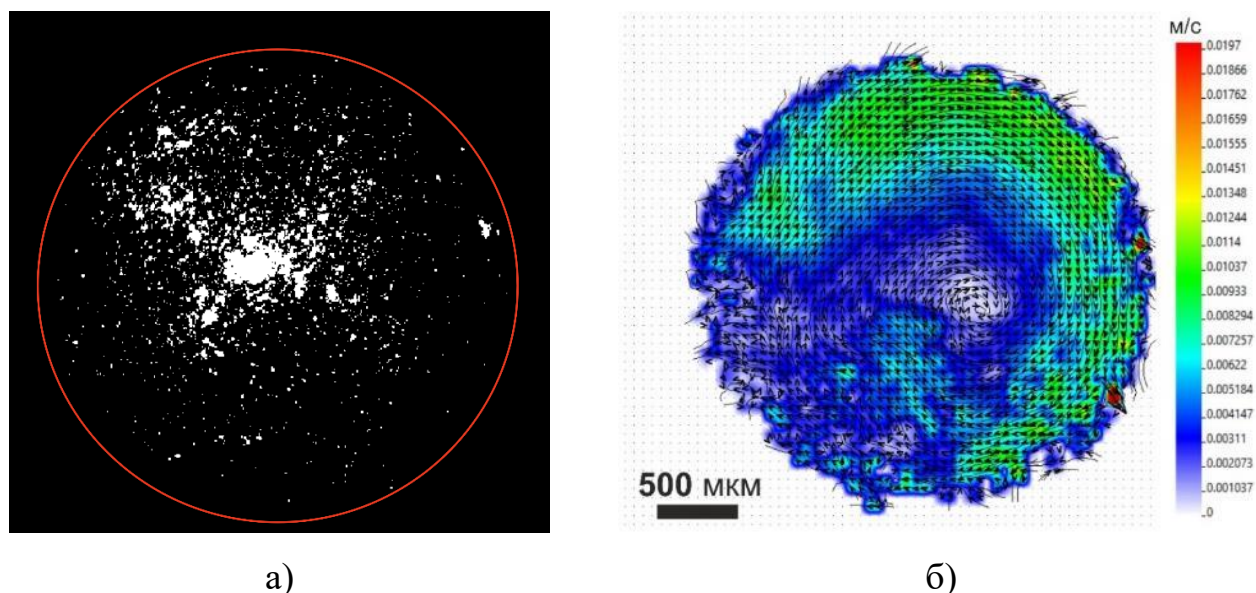


Рисунок 2.5 – Типичные кадры с иллюстрацией процессов обработки видеозаписей методом MicroPIV: а) исходное изображение капли с трассерами непосредственно после ее помещения на нагретую поверхность (красный контур – границы капли);

б) итоговое изображение поля скоростей конвективных потоков с линиями токов, полученное для всего процесса испарения капли

Охлаждение приповерхностного слоя за счет испарения капли воды регистрировалось по показаниям термопары 1 (рисунок 2.3). Толщина стенки между спаем термопары 1 и верхней границей поверхности, на которой расположена капля, не превышала 160 мкм. Типичная зависимость изменения температуры полированной поверхности (Polished), зарегистрированной термопарой 1, за счет испарения капли воды объемом 5 мкл приведена на рисунке 2.6.

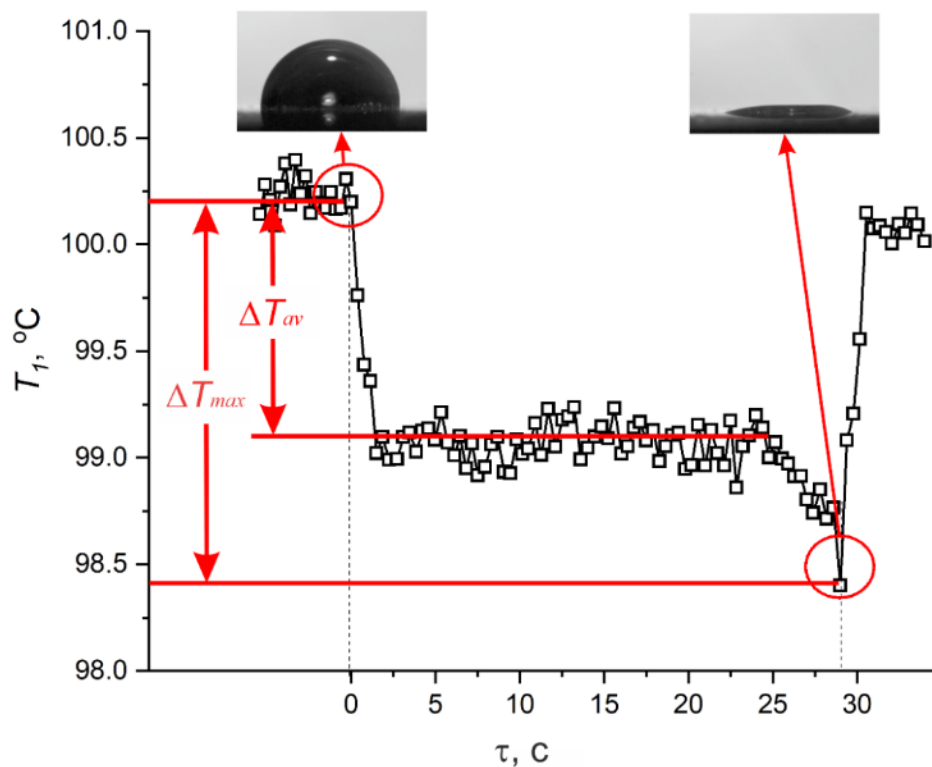


Рисунок 2.6 – Изменение температуры приповерхностного слоя на толщине 160 мкм под испаряющейся каплей воды объемом 5 мкл на полированной поверхности. Фотоизображения каплей соответствуют началу и завершению процесса испарения.  $\Delta T_{av}$ ,  $\Delta T_{max}$  – среднее и максимальное понижение температуры приповерхностного слоя

## **2.2 Характеристики процесса испарения капель воды, расположенной на теплопередающей поверхности**

### **2.2.1 Исследование геометрических параметров и свойств смачивания поверхностей**

На рисунке 2.7 приведены СЭМ-изображения бифильных поверхностей IV и V групп с одним (BiPhi1, BiPhi3) и тремя концентрическими супергидрофильными кольцами (BiPhi2, BiPhi4). Из рисунка 2.7 видно, что конфигурация концентрических супергидрофильных колец соответствует прогнозируемым характеристикам, определенных по графо-аналитической методике, описанной в [67]. Суть подхода создания бифильных поверхностей IV и V групп заключалась в формировании лазерным излучением участков (колец) с супергидрофильными свойствами с заданной конфигурацией и геометрическими размерами на поверхности, характеризующейся супергидрофобными свойствами III группы и на гидрофильной, полированной поверхности I группы. СЭМ-изображения I, II и III групп не приведены по причине того, что в каждой из перечисленных групп текстура и химический состав однородны по поверхности. Следовательно, свойства смачиваемости по поверхности тоже однородны. Кроме того, СЭМ-изображения поверхностей I группы подобны изображениям полированной (гидрофильной) части поверхностей V группы (рисунок 2.7в – 2.7г). А СЭМ-изображения поверхностей II и III групп подобны изображениям супергидрофобной (SHPho) части поверхностей IV группы (рисунок 2.7а – 2.7б). Последнее объясняется тем, что текстура поверхностей II и III групп, также как текстура супергидрофобных участков IV группы поверхностей сформирована при идентичных характеристиках обработки лазерным излучением. А характеристики участков полированной (гидрофильной) части V группы идентичны характеристикам поверхностей I группы.

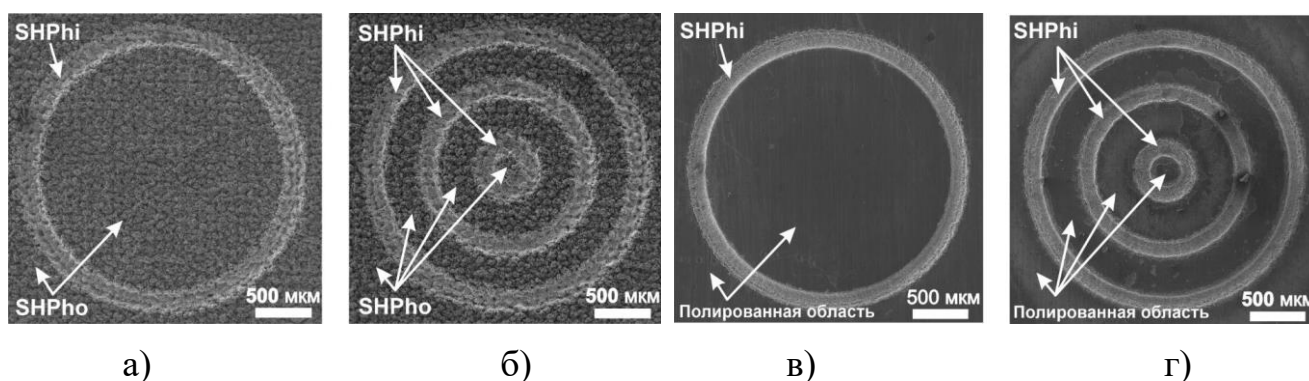


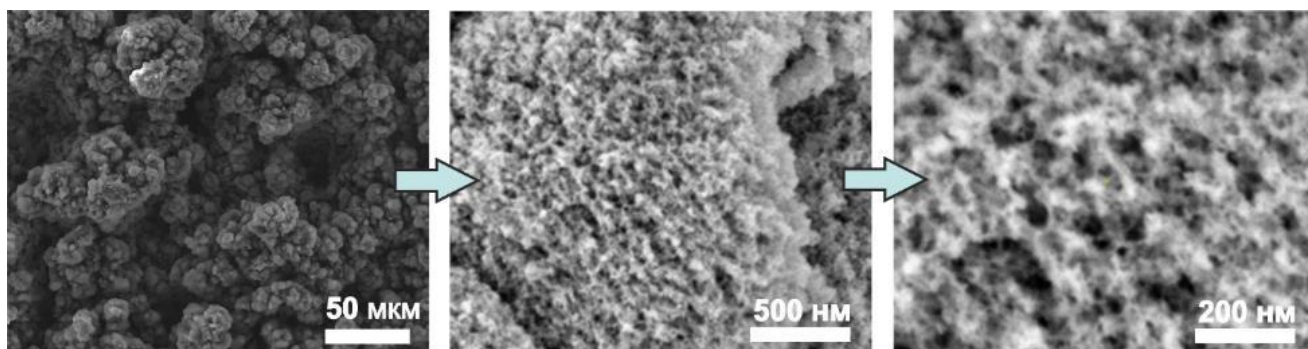
Рисунок 2. 7 – СЭМ-изображения бифильных поверхностей: а) BiPhi1; б) BiPhi2; в) BiPhi3; г) BiPhi4

На рисунке 2.8 приведены СЭМ-изображения высокого разрешения участков поверхностей, модифицированных лазерным излучением. По результатам анализа рисунка 2.8 установлено, что текстуры SHPhi (II группы) (рисунок 2.8а), SHPho (III группы) (рисунок 2.8б), а также супергидрофобной области BiPhi1, BiPhi2 (IV группы) (рисунок 2.8в) и супергидрофильной области BiPhi3, BiPhi4 (V группы) (рисунок 2.8д) подобны. Эти текстуры развиты, многомодальны (разноуровневые), характеризуются высокой пористостью на наноуровне.

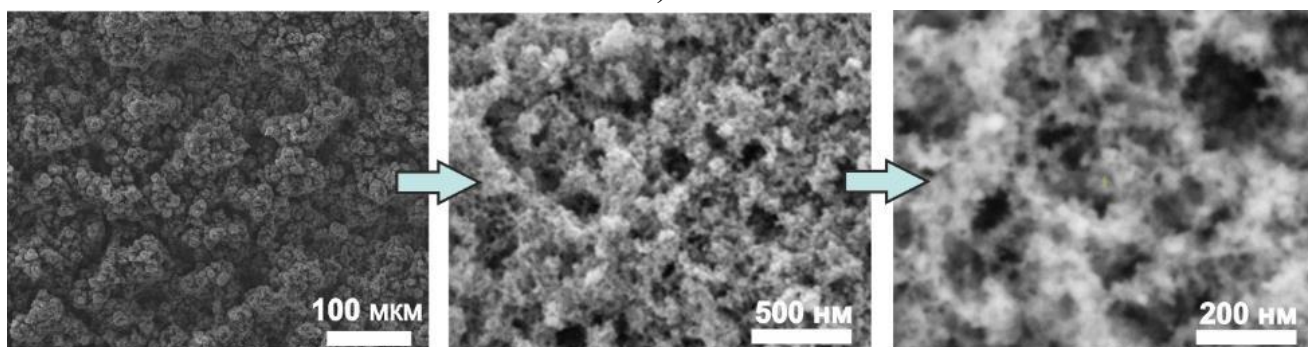
Известно [71], что для формирования супергидрофобных поверхностей помимо изменения химического состава за счет осаждения гидрофобных групп, характеризующихся низкой поверхностной энергией необходимо формирование развитой, многомодальной (на микро- и наноуровне) текстуры. Изображения текстур на рисунках 2.8б и 2.8в свидетельствуют о формировании лазерным излучением необходимой шероховатости для формирования супергидрофобной поверхности SHPho и супергидрофобной части поверхности на BiPhi1 и BiPhi2.

Также известно [65], что механизм гидрофобизации может осуществляться либо физической адсорбцией, либо хемосорбцией. В связи с тем, что на микро- и наноуровне не зарегистрировано изменений текстуры между супергидрофильными (рисунок 2.8а, рисунок 2.8д) и супергидрофобными (рисунок 2.8б, рисунок 2.8в) областями поверхностей, текстурированных лазерным излучением, сделан вывод о том, что гидрофобизация поверхностей углеводородными загрязнениями в условиях проведенных экспериментов происходит преимущественно по

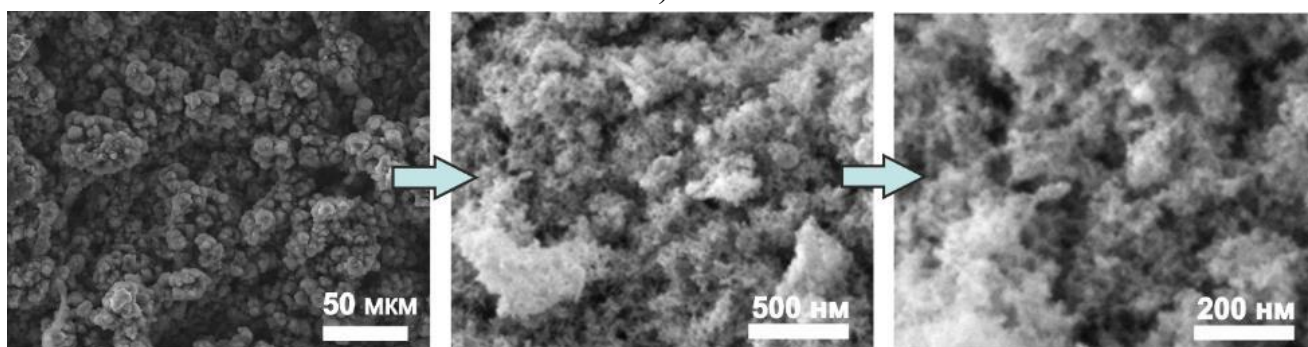
механизму хемосорбции. На супергидрофобных областях не зарегистрировано формирование каких-либо частиц (загрязнений) или их агломерации. Однако исключать и значительную составляющую физической адсорбции нельзя, так как углеводородные загрязнения могут быть размером меньше возможностей регистрации текстуры электронным сканирующим микроскопом.



а)



б)



в)

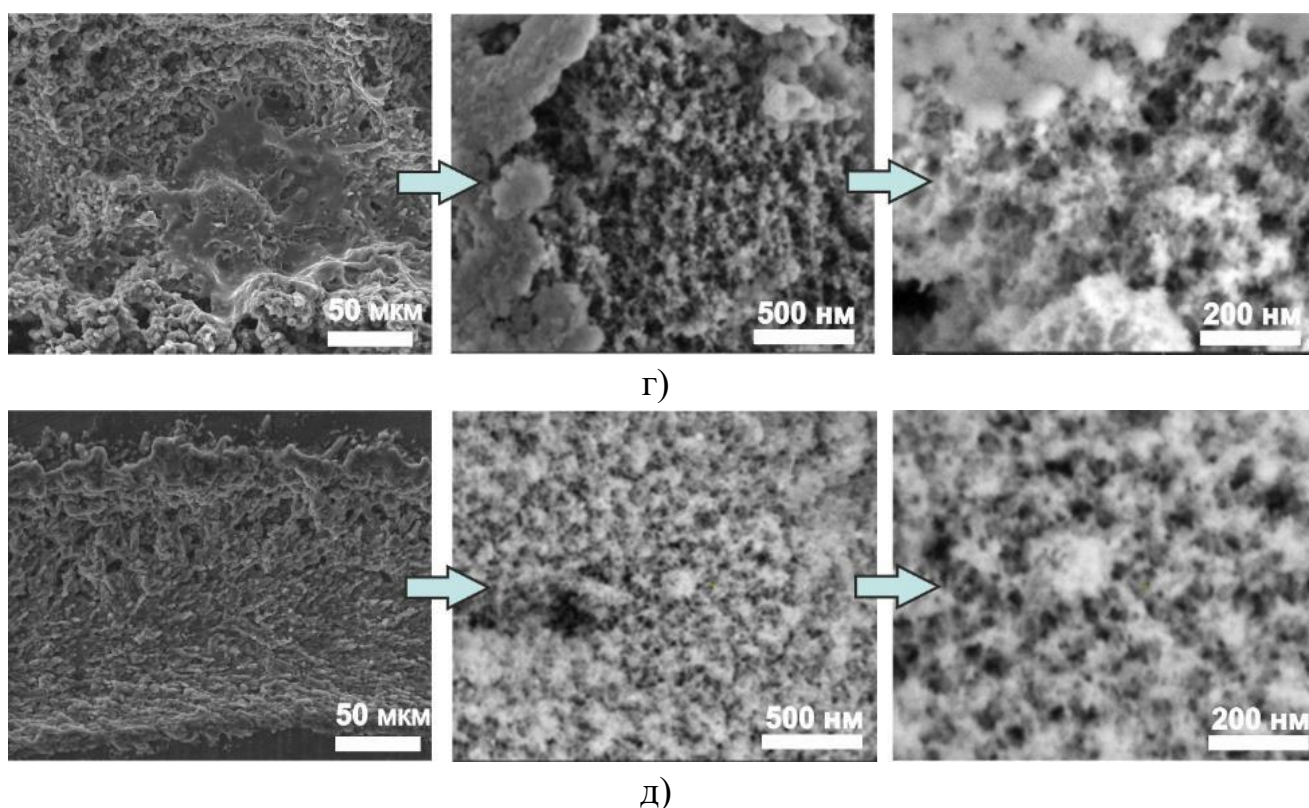


Рисунок 2.8 – Типичные СЭМ-изображения поверхностей. Участки поверхностей: а) SHPhi (II группы); б) SHPho (III группы); в) BiPhi1 (супергидрофобной области поверхностей IV группы); г) BiPhi1 (супергидрофильной области поверхностей IV группы); д) BiPhi3 (супергидрофильной области поверхностей V группы)

По результатам анализа рисунка 2.8 установлено, что текстура супергидрофильной области на поверхностях BiPhi1, BiPhi2 (рисунок 2.8г) имеет явное отличие от супергидрофильных (рисунок 2.8а и рисунок 2.8д) и супергидрофобных (рисунок 42.8б и рисунок 2.8г) текстур, сформированных однократным воздействием лазерного излучения. В результате повторной обработки супергидрофобной поверхности лазерным излучением, с целью создания супергидрофильных концентрических кругов, помимо пористой разноуровневой шероховатости сформировались плотные по текстуре на микро- и наноуровне агломераты (рисунок 2.8г). Последнее обусловлено процессами плавления развитой текстуры супергидрофобной поверхностей.

На рисунке 2.9 приведены 3D-изображения поверхностей, полученные с помощью микроскопа Olympus Lext OLS4100.

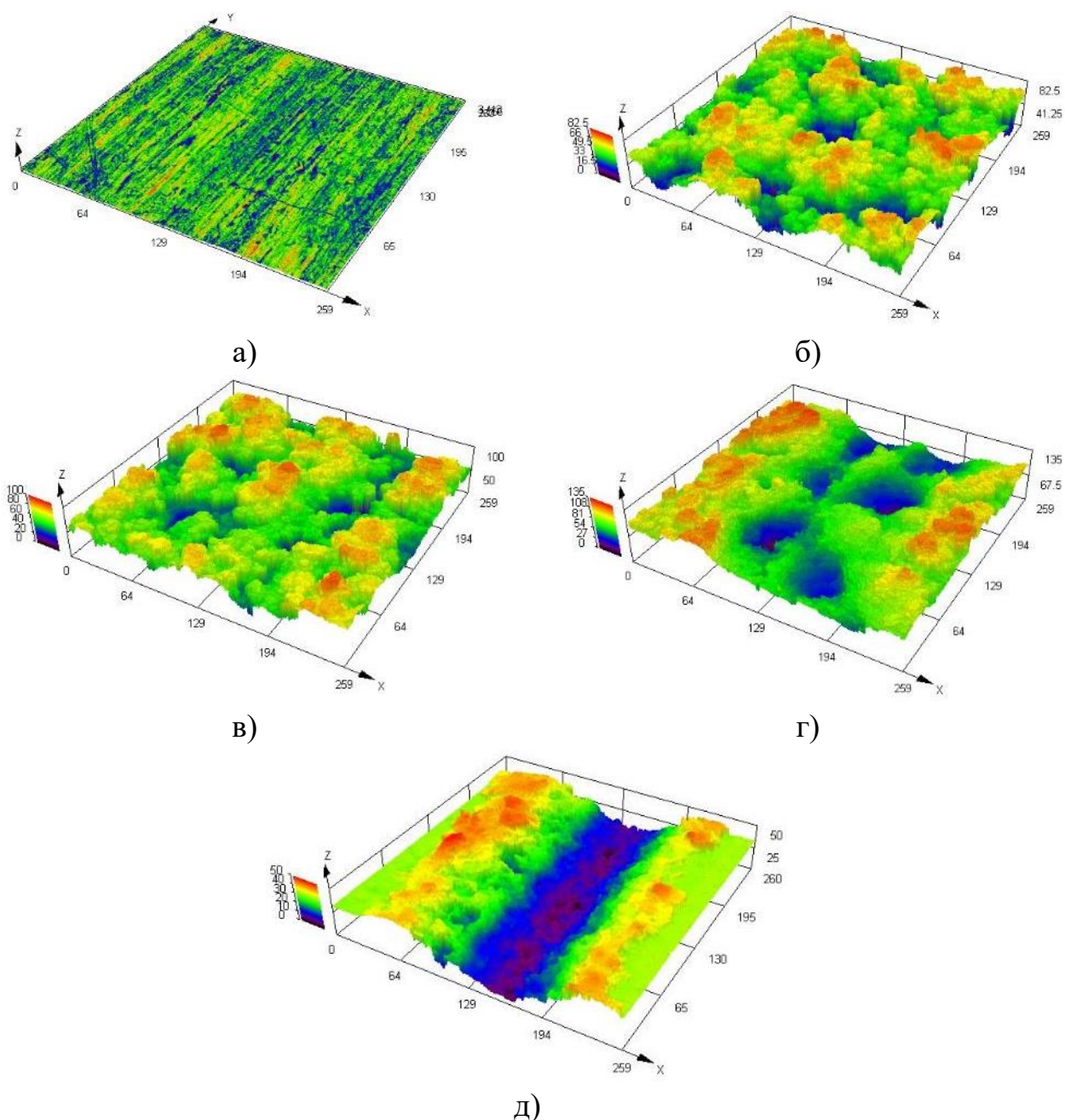


Рисунок 2.9 – Типичные 3D-изображения поверхностей. Поверхность (группа):  
а) Polished (I); б) SHPhi (II); в) SHPho (III); г) BiPhi1 (IV); д) BiPhi3 (V)

В таблице 2.2 приведены средние значения 3D-характеристик текстур (параметры шероховатости), полученные по результатам анализа 3D-изображений поверхностей (рисунок 2.9). По результатам анализа рисунка 2.9 и 3D-характеристик (таблица 2.2) установлено, что текстура полированных поверхностей I группы сформирована микроканалами со средним размером  $S_z = 2,43$  мкм (таблица 2.2), средняя шероховатость поверхности составляет 0,35 мкм, прирост площади поверхности за счет шероховатости поверхности

составляет порядка 1 %. По значениям  $Sku = 2,22$  установлено, что выступы характеризуются плосковершинностью (значение  $Sku < 3$ ).

Таблица 2.2 – 3D-характеристики текстур

| Группа поверхностей                                             | Sa, мкм | Sz, мкм | Sku  | Sdr, % |
|-----------------------------------------------------------------|---------|---------|------|--------|
| I (полированная, $\theta_0 = 87,8^\circ$ )                      | 0,35    | 2,43    | 2,22 | 1,07   |
| II (супергидрофильная, $\theta_0 \approx 0$ )                   | 12,92   | 90,69   | 2,55 | 559,00 |
| III (супергидрофобная, $\theta_0 = 152,5^\circ$ )               | 12,81   | 89,02   | 2,59 | 554,02 |
| IV (бифильная $\theta_0 \approx 0$ / $\theta_0 = 152,5^\circ$ ) | 18,07   | 131,43  | 2,46 | 405,10 |
| V (бифильная $\theta_0 \approx 0$ / $\theta_0 = 87,8^\circ$ )   | 12,58   | 61,47   | 2,36 | 134,4  |

Текстура (шероховатость) II и III групп поверхностей подобны. Расхождение значений параметров шероховатости Sa, Sz, Sku и Sdr находится в пределах погрешности их определения. Установлено, что обработка поверхностей лазерным излучением приводит к значительному увеличению средней шероховатости поверхностей алюминия до 13 мкм. Среднее значение параметров Sz составляет порядка 90 мкм, что приводит к росту площади поверхности более чем в 5 раз ( $Sdr > 550$  %). Стоит отметить, что выступы на поверхностях II и III групп поверхностей плосковершинные (значение  $Sku < 3$ ). Однако их форма более близка к гауссову распределению ( $Sku \approx 2,55 - 2,29$ ), чем на полированных поверхностях I группы ( $Sku = 2,22$ ).

Из рисунка 2.9д видно, что в условиях формирования супергидрофильных концентрических кругов на полированных поверхностях (V группа поверхностей) образуется микроканал правильной геометрической формы. А в условиях формирования подобных супергидрофильных участков на гидрофобной поверхности (рисунок 2.9г) по траектории движения луча лазера образовался микроканал не правильной геометрической формы. Последнее обусловлено тем, что при воздействии луча лазера на поверхность с развитой, пористой текстурой за счет дифракции возникают поверхностные электромагнитные волны [72]. Последние влияют на генерацию высших гармоник при отражении лазерного

излучения, что влияет в свою очередь на процессы плавления и абляции материала и, соответственно, формирование микроканала. По результатам анализа трехмерных параметров шероховатости (таблица 2.2) установлено, что значения характеристик  $S_a$  и  $S_z$  бифильных поверхностей IV группы превышают значения аналогичных величин II и III группы. Но прирост площади поверхностей IV группы (характеристика  $S_{dr}$ ) меньше, чем на поверхности II и III группы. Последнее обусловлено тем, что на поверхности IV группы сформировались плотные по текстуре на микро- и наноуровне агломераты (рисунок 2.9г). Вследствие их образования уменьшилась пористость, и текстура стала менее развитой. Из таблицы 2.2 видно, что текстура бифильной поверхности V группы менее развита по сравнению с бифильной поверхностью IV группы (значения параметров шероховатости ниже).

Значения статических контактных углов и углов скатывания, характеризующих свойства смачивания образцов АМг-2, определялись до проведения экспериментов по испарению. По результатам анализа статических контактных углов и углов скатывания установлено, что поверхности SHPho и супергидрофобные области поверхностей BiPhi1 и BiPhi2 характеризуется углами скатывания  $\theta_{roll} \approx 12 \pm 4$ . Последнее свидетельствует о том, после проведения процедуры низкотемпературного отжига процесс инверсии свойств смачивания от супергидрофильных к супергидрофобным за счет адсорбции углеводородных загрязнений завершен. Поверхности демонстрируют стабильные супергидрофобные свойства, что хорошо согласуется с известными результатами [71] подобных подходов гидрофобизации.

## 2.2.2 Исследование характеристик испарения

### 2.2.2.1 Анализ изменения геометрических характеристик и скорости испарения капель

На рисунке 2.10 представлены зависимости безразмерных параметров контактного угла, контактного диаметра, объема капли от безразмерного времени её испарения. Безразмерные параметры определены как отношение  $i$ -го значения к наибольшему значению экспериментально зарегистрированной величины. Для случая контактного угла  $\theta_i/\theta_{max}$ , где  $\theta_{max} = 144,8^\circ$  (зарегистрировано на поверхности SHPho); контактного диаметра  $d_i/d_{max}$ , где  $d_{max} = 3,55$  мм (зарегистрировано на поверхности BiPhi4); объема  $V_i/V_{max}$ , где  $V_{max} = 5$  мкл (начальный объем капли); времени испарения  $\tau_i/\tau_{max}$ , где  $\tau_{max} = 108$  с (зарегистрировано на поверхности SHPho). Также на рисунке 2.10 представлены зависимости удельной скорости испарения капли воды от безразмерного времени её испарения. Доверительным интервалом на рисунке 2.10 показана случайная погрешность с учетом инструментальной погрешности приборов измерения. На рисунке 2.10 не приведены данные, полученные в условиях испарения капли воды на поверхности SHPhi, поскольку капля на такой поверхности растекается в тонкую пленку. В таких условиях используемая аппаратно-лабораторная база (система регистрации быстропротекающих процессов) не позволяла зарегистрировать исследуемые характеристики  $\theta_i = f(\tau)$ ,  $d = f(\tau)$ ,  $V = f(\tau)$ ,  $W = f(\tau)$ . В экспериментальных исследованиях с использованием малоинерционных высокоточных микротермопар определялось охлаждение приповерхностного слоя при дозировании на него капли дистиллированной воды. Последнее позволило установить времена испарения капель на поверхности SHPhi.

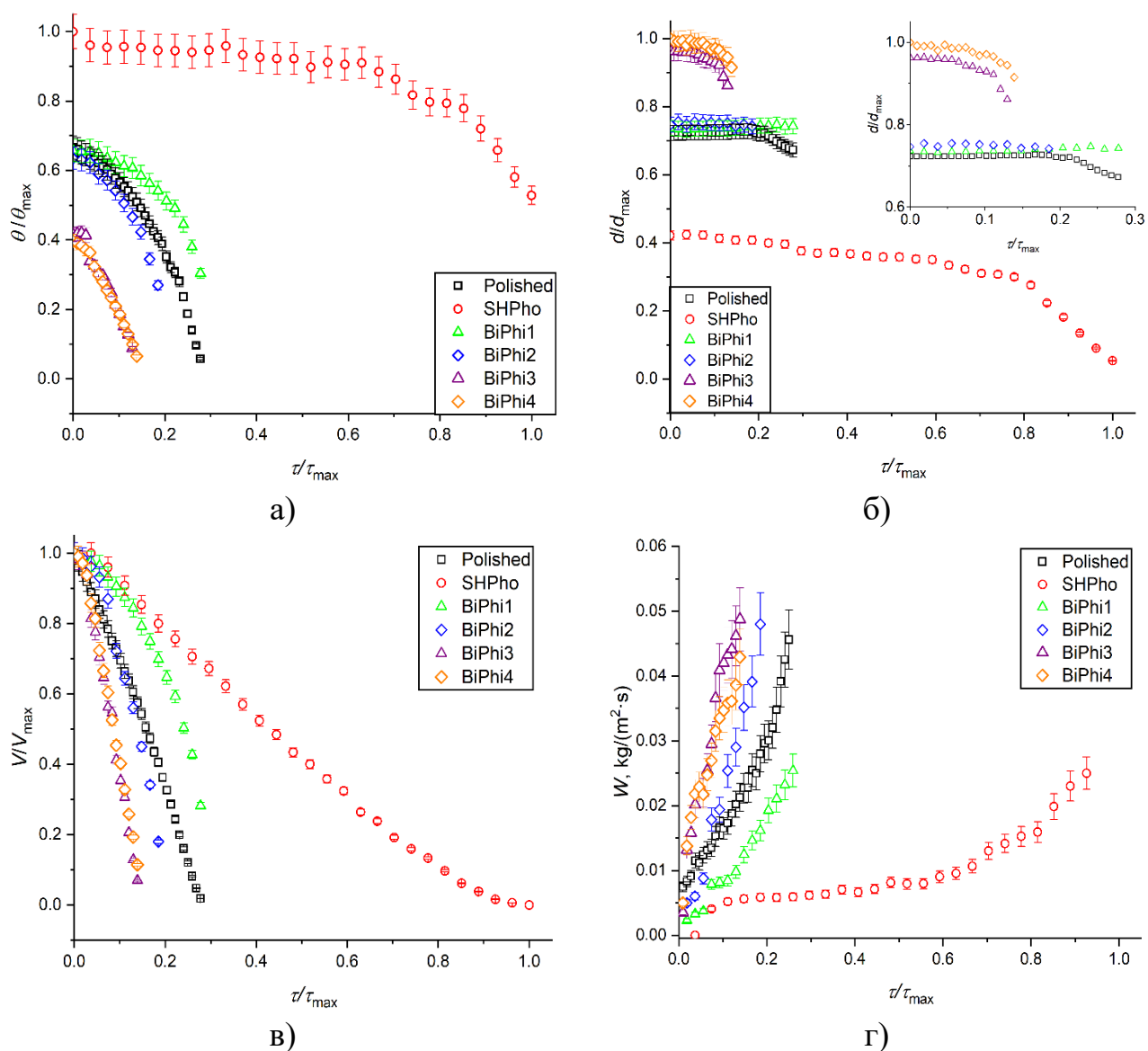


Рисунок 2.10 – Зависимости безразмерных геометрических размеров и удельной скорости испарения капли воды от безразмерного времени её испарения: а) контактного угла; б) контактного диаметра; в) объем капли; г) удельной скорости испарения

Известно [73], что при идентичных условиях капля теплоносителя интенсивнее испаряется на поверхностях, характеризующихся лучшими свойствами смачивания, т.е. капля быстрее испаряется на гидрофильных поверхностях по сравнению с гидрофобными. Последнее обусловлено тем, что передача теплоты от поверхности к капле осуществляется преимущественно за счет кондуктивного подвода теплоты. На гидрофильных поверхностях площадь поверхности теплообмена между каплей и поверхностью нагрева, которая

характеризуется контактным диаметром, много больше аналогичной характеристики на гидрофобных поверхностях. Количество теплоты, передающейся от поверхности к капле, будет выше в случае гидрофильной поверхности, следовательно, процесс испарения осуществляется интенсивнее. Как и ожидалось в проведенных экспериментах наименьшее время испарения капли воды объемом 5 мкл, в условиях нагрева поверхностей до 100 °С, зарегистрировано на супергидрофильной поверхности SHPhi (2 с определено в исследованиях охлаждения приповерхностного слоя), наибольшее время испарения на супергидрофобной SHPho (108 с). Из рисунка 2.10 видно, что на бифильных поверхностях BiPhi3 и BiPhi4 комбинация гидрофильных и супергидрофильных свойств существенно интенсифицирует процесс испарения капли воды по сравнению с комбинацией экстремальных свойств смачивания (супергидрофобных и супергидрофильных) на бифильных поверхностях BiPhi1 и BiPhi2. Последнее обусловлено преимущественно большим контактным диаметром растекания капли по поверхностям BiPhi3 и BiPhi4 по сравнению с BiPhi1 и BiPhi2 (рисунок 2.10б).

В условиях комбинации гидрофильных и супергидрофильных свойств наличие одного (BiPhi3) и трех (BiPhi4) супергидрофильных колец на бифильных поверхностях не существенно повлияло на изменение геометрических размеров капли (рисунок 2.10а – 2.10в) и удельной скорости испарения (рисунок 2.10г). А в условиях комбинации экстремальных свойств смачивания на бифильных поверхностях BiPhi1 и BiPhi2 число супергидрофильных колец существенно влияет на изменение геометрических размеров капли (рисунок 2.10а – 2.10в) и удельной скорости испарения (рисунок 2.10г). Из рисунка 2.10г видно, что интенсивность испарения (скорость испарения) капли воды на бифильной поверхности BiPhi2 с экстремальными свойствами смачивания и тремя супергидрофильными кольцами выше, чем на полированной поверхности Polished. А на поверхности BiPhi1 с экстремальными свойствами смачивания и одним супергидрофильным кольцом интенсивность испарения значительно ниже, чем на полированной поверхности Polished (рисунок 2.10г). Последнее обусловлено тем, что на поверхности BiPhi1 на оси симметрии супергидрофильного кольца (в

супергидрофобной части поверхности) в начале процесса испарения капли воды устойчиво формируется паровой пузырь (рисунок 2.11). Со временем пузырь увеличивается в размерах до внутренней границы супергидрофильного кольца. При испарении капли не менее чем на  $2/3$  части начального объема пузырь разрушается с образованием сухого пятна. После разрушения такого парового пузыря не испарившаяся часть теплоносителя распределяется по супергидрофильной части кольца. Образование сухих пятен нежелательно в системах термостабилизации оборудования (охлаждения), поскольку сопровождаются значительным перегревом охлаждаемой поверхности [74]. По результатам проведенных экспериментов установлено, что на поверхности BiPhi2 (с тремя концентрическими супергидрофильными кольцами), а также на поверхностях BiPhi3 и BiPhi4 не образуется подобного рода пузырей. Последнее свидетельствует о том, что дизайн (конфигурация и расположение) частей с экстремальными свойствами смачивания на бифильных поверхностях является доминирующим фактором формирования сухих пятен на супергидрофобной части поверхности в условиях испарения капель теплоносителей при температурах характерных началу формированию паровой фазы.

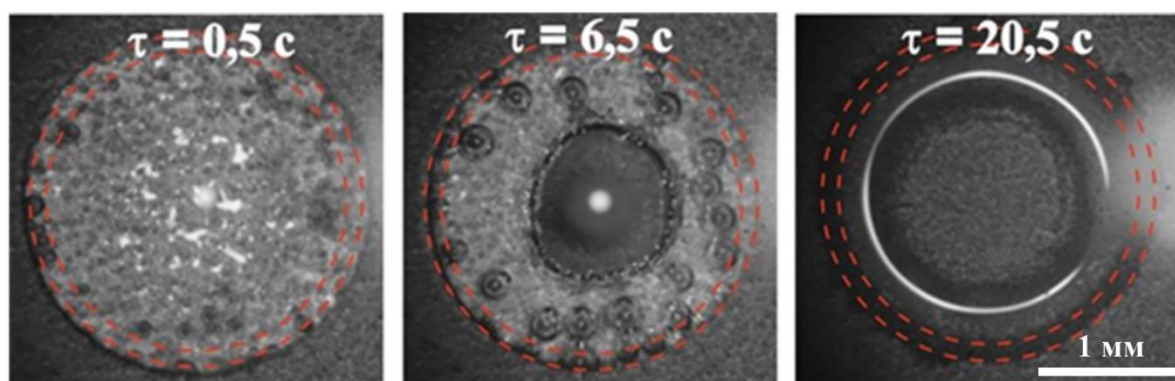


Рисунок 2.11 – Формирование сухого пятна при испарении капли воды объёмом 5 мкл на бифильной поверхности BiPhi1 нагретой до 100 °C

По результатам проведенных экспериментов сделаны выводы о том, что для интенсификации процессов испарения (увеличению скорости испарения) малых объемов теплоносителей при температурах характерных началу формированию

паровой фазы теплоносителей комбинация гидрофильных и супергидрофильных свойств на бифильных поверхностях более предпочтительна по сравнению с комбинацией экстремальных свойств смачивания (супергидрофильных и супергидрофобных) на бифильных поверхностях нагрева. Выбор дизайна (конфигурации и расположения) частей поверхности, характеризующихся различными свойствами смачивания, оказывает влияние не только на интенсивность испарения теплоносителя, но в случае экстремальных свойств смачивания на бифильных поверхностях является основным фактором формирования сухих пятен за счет разрушения паровых пузырей на супергидрофобной части поверхности.

Известно [75,76], что капля теплоносителя может испаряться в одном из трех сменяющих друг друга режимах: 1) «пиннинга» (постоянного контактного диаметра), при котором контактный диаметр постоянен, контактный угол уменьшается; 2) постоянного контактного угла, при котором контактный угол постоянен, контактный диаметр уменьшается; 3) смешанном, при котором уменьшаются и контактный угол и контактный диаметр. По результатам анализа зависимостей контактного угла и контактного диаметра капли (рисунок 2.10а и рисунок 2.10б) выделены режимы испарения. Капля воды на поверхности Polished испаряется в режиме постоянного контактного диаметра на протяжении 80 % времени от полного времени испарения. После чего режим постоянного контактного диаметра сменяется смешанным, который характеризуется уменьшением контактного угла и контактного диаметра капли. На SHPho поверхности зарегистрирован режим постоянного контактного угла (30 % от полного времени испарения), сменяющийся смешанным режимом. Зарегистрированные режимы испарения на поверхностях Polished и SHPho, их смена и продолжительность хорошо согласуются с известными экспериментальными данными [75,76], т.е. характерны для полированных гидрофильных и супергидрофобных поверхностей металлов.

Режимы испарения капель на поверхностях BiPhi3 и BiPhi4 аналогичны режимам на Polished: режим постоянного контактного диаметра (40 – 50 % от

полного времени испарения) сменяется сжатием капли с уменьшением контактного диаметра и контактного угла. Последнее связано с тем, что бифильные поверхности BiPhi3 и BiPhi4 состоят из супегидрофильных колец и гидрофильных полированных участков, поэтому механизм движения контактной линии капли в процессе испарения аналогичен случаю на Polished поверхности. В режиме «пиннинга» диаметр капли объемом 5 мкл находится в диапазоне 3,4 – 3,6 мм, что больше диаметра супергидрофильного кольца (2,5 мм), то есть капля растекается за его пределы. На основании сравнения режимов испарения на гидрофильных полированных поверхностях Polished и бифильных поверхностях с комбинацией гидрофильных и супергидрофильных свойств можно сделать следующие выводы:

- 1) на бифильных поверхностях с комбинацией гидрофильных и супергидрофильных свойств режимы испарения капель теплоносителей и их последовательность подобны аналогичным характеристикам на полированных гидрофильных поверхностях металлов;
- 2) комбинация гидрофильных и супергидрофильных свойств на бифильных поверхностях в сравнении с полированными поверхностями металлов значительно влияет на длительность режимов испарения. Установлено, что на бифильных поверхностях комбинация гидрофильных и супергидрофильных свойств смачивания позволяет уменьшить длительность «пиннинга» на 30 – 40 % и, соответственно, увеличить продолжительность смешенного режима испарения от времени полного испарения капли жидкости.

Особенность режимов испарения капель на бифильных поверхностях с комбинацией супергидрофильных и супергидрофобных свойств заключается в том, что на них капля испаряется в одном режиме постоянного контактного диаметра в продолжение всего времени жизни. Линия трехфазного контакта «пиннингуется» (зацепляется) в области супегидрофильного кольца. При этом внешняя по отношению к кольцу супергидрофобная область препятствует дальнейшему растеканию капли. В таких условиях контактный диаметр капли теплоносителя на нагретой поверхности равен диаметру супергидрофильного кольца (2,5 мм). Последнее имеет важное практическое значение для разработки систем

охлаждения на базе капельного орошения и решения одной из основных фундаментальных проблем, сдерживающих развитие таких систем охлаждения. В системах охлаждения на базе капельного орошения использование даже идентичных систем орошения не позволяет контролировать гидродинамические характеристики распыления и, соответственно, локализацию капель охлаждаемого теплоносителя, их геометрические размеры (в том числе контактного диаметра) на теплонагруженной охлаждаемой поверхности. Проведенные эксперименты показали, что формирование с заданными размерами концентрических супергидрофильных колец на супергидрофобной поверхности позволяет управлять режимами испарения капель, с высокой точностью контролировать контактный диаметр капли в режиме испарения постоянного контактного диаметра. Последнее является решением актуальной проблемы в системах спреевого (капельного) охлаждения, заключающейся в нестабильной локализации капель на теплонагруженной охлаждаемой поверхности.

#### **2.2.2.2 Анализ охлаждения приповерхностного слоя**

Исследование процесса охлаждения приповерхностного слоя на заданной толщине актуально в связи с возможностью использования полученных выводов и закономерностей при конструировании систем термостабилизации на базе спреевого (капельного) охлаждения [3,5,77]. Оценка охлаждения определена как разница температур приповерхностного слоя до момента помещения капли и в процессе её испарения ( $\Delta T$ ). По результатам анализа зависимостей изменения температуры приповерхностного слоя от времени (рисунок 2.12), зарегистрированных в идентичных условиях нагрева и окружающей среды при испарении капли воды объемом 5 мкл установлено, что вид кривых, характеризующих снижение температуры приповерхностного слоя за счет испарения капли теплоносителя, зависит от свойств смачивания и конфигурации расположения участков с различной смачиваемостью.

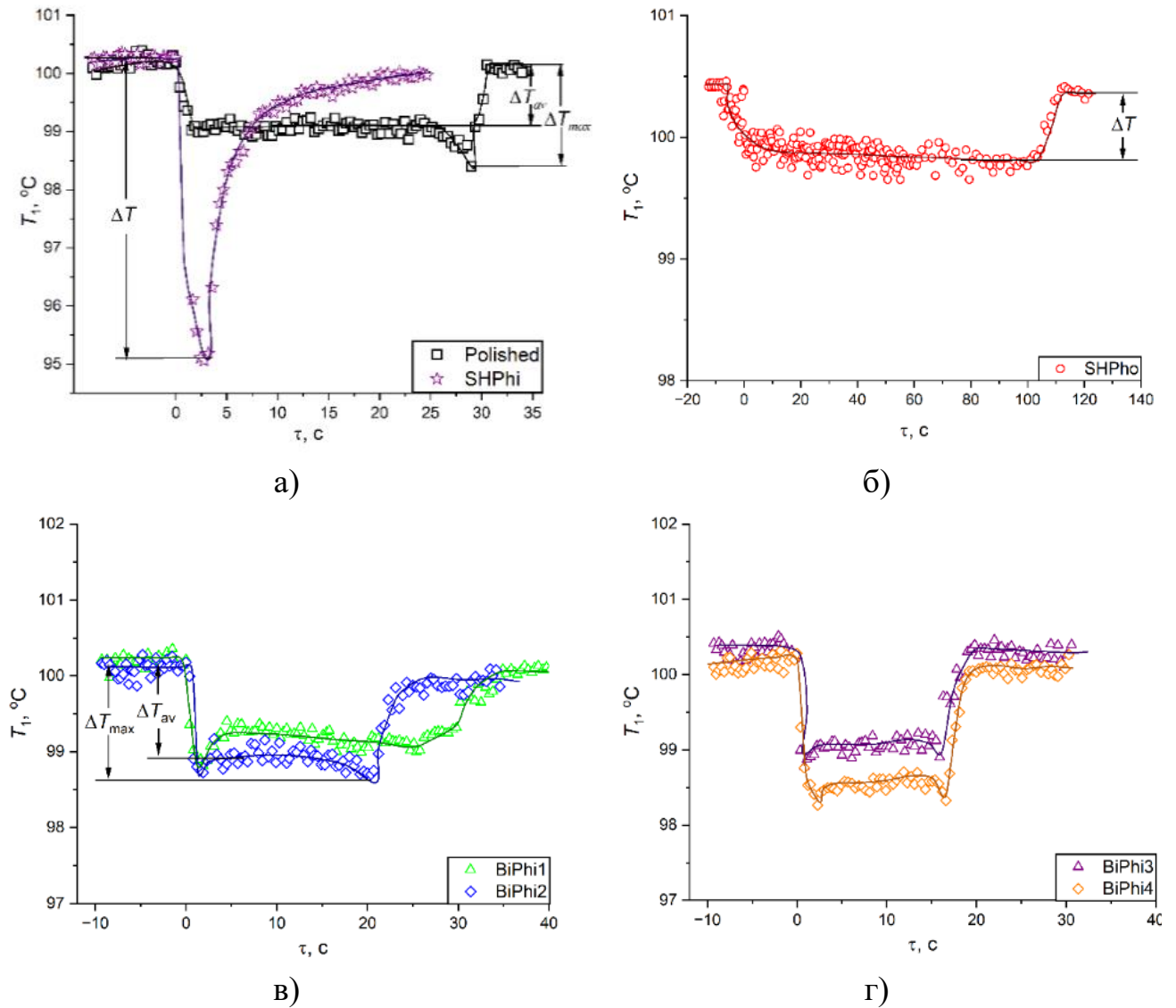


Рисунок 2.12 – Изменение температуры приповерхностного слоя (на толщине 160 мкм) под испаряющейся каплей воды объемом 5 мкл на поверхностях: а) Polished и SHPhi; б) SHPho; в) BiPhi1 и BiPhi2; г) BiPhi3 и BiPhi4

Установлено, что капля воды объемом 5 мкл растекается по поверхности SHPhi в тонкую пленку. Известно [8], что на супергидрофильных поверхностях жидкость находится в состоянии Венция, заполняет полости модифицированной текстуры [72,78] вытесняя из них воздух. Из рисунка 2.8а видно, что микро- и нанополости на поверхности SHPhi взаимосвязаны, глубина микронеровностей более 90 мкм ( $S_z = 90,69$  мкм, таблица 2.2), за счет развитой текстуры прирост площади поверхности составил более 5,5 раз ( $S_{dr} = 559$  мкм, таблица 2.2). За счет прироста площади поверхности процесс передачи теплоты от нагретой

поверхности к дозируемой на нее капле жидкости интенсифицируется. Последнее является основной причиной относительно большого снижения температуры  $\Delta T = 5 \text{ C}$  (рисунок 2.12а) на поверхности SHPhi. По мере испарения теплоносителя температура возрастает и достигает начальных значений ( $\approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Из рисунка 2.12б видно, что вид кривой, характеризующей снижение температуры приповерхностного слоя на SHPho отличается от SHPhi. Из рисунка 2.8 видно, что вид текстур SHPho и SHPhi однотипен, а трехмерные параметры шероховатости близки по значениям (таблица 2.2). На SHPho зарегистрировано незначительное уменьшение температуры в течение 20 с после дозирования капли, после чего  $\Delta T = 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  постоянна до завершения процесса испарения. Такое различие в характеристиках охлаждения приповерхностного слоя на поверхностях SHPho и SHPhi обусловлено не только различием площади межфазного контакта «поверхность–жидкость» (в случае SHPhi она существенно больше) через которую происходит подвод теплоты, но и обусловлено состоянием жидкости на поверхности. В случае SHPho капля на поверхности находится в состоянии Касси-Бакстера [9]. Микро- и нанополости текстуры SHPho под каплей заполнены воздухом, который характеризуется высоким термическим сопротивлением. В таких условиях площадь межфазного контакта «поверхность–жидкость» через которую реализуется процесс подвода теплоты к капле ограничена вершинами выступов, образующих шероховатость поверхности. Последнее является причиной незначительного ( $\Delta T = 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) охлаждения приповерхностного слоя SHPho.

На полированной гидрофильной поверхности Polished, а также на бифильных поверхностях условно можно выделить два значения уменьшения температуры поверхности за счет фазового перехода капли:  $\Delta T_{\text{av}}$  и  $\Delta T_{\text{max}}$  – это среднее и максимальное значение уменьшения температур (рисунок 2.12), соответственно. Из рисунка 2.12а видно, что на поверхности Polished при дозировании капли воды температура поверхности под каплей уменьшается на  $\Delta T_{\text{av}}$ . В процессе испарения капли температура поверхности остается постоянной ( $\Delta T_{\text{av}} = f(\tau) = \text{const}$ ) до момента изменения режима постоянного контактного диаметра на смещенный

режим испарения. В смешанном режиме испарения температура под каплей монотонно уменьшается на  $\Delta T_{\max}$ . Уменьшение температуры в смешанном режиме на поверхности Polished объясняется тем, что за счет неравномерного движения линии трехфазного контакта разрушается форма капли в виде шарового сегмента, линия трехфазного контакта из окружности трансформируется в кривую Безье (фотоизображение капли на рисунок 2.13а  $\tau = 30$ с). Последнее увеличивает длину линии трехфазного контакта. Известно [79], что в области микрорегиона на линии трехфазного контакта отводимый тепловой поток в разы превосходит аналогичную характеристику с межфазной поверхности «жидкость – воздух (окружающая среда)». За счет увеличения длины линии трехфазного контакта происходит интенсификация испарения, что подтверждается ростом удельной скорости испарения (рисунок 2.10г) на завершающем этапе испарения капли. В следствие интенсификации фазового перехода температура поверхности Polished под каплей уменьшается на  $\Delta T_{\max}$  рисунок 2.12а. Необходимо отметить, что если при изменении режима испарения постоянного контактного диаметра на смещенный режим контактный диаметр на полированной поверхности Polished равномерно уменьшается к центру, форма капли в виде шарового сегмента не разрушается, т.е. линия трехфазного контакта из окружности не трансформируется в кривую Безье, то в таких условиях в смешанном режиме не происходит уменьшение температуры на  $\Delta T_{\max}$ . Вид кривой  $T = f(\tau)$  будет однотипен кривой на супергидрофобной поверхности (рисунок 2.12б). Стоит отметить, что в проведенных сериях экспериментов на поверхности Polished преимущественно реализовывались условия трансформации линии трехфазного контакта в кривую Безье. Равномерное уменьшение контактного диаметра на полированной поверхности Polished регистрировалось редко. Из таблицы 2.2 видно, что на поверхности Polished средняя шероховатость характеризуется  $Sa = 0,35$  мкм, на поверхности расположены неровности размером  $Sz = 2,43$  мкм. Трансформация линии трехфазного контакта в смещенном режиме испарения из окружности правильной геометрической формы в кривую Безье происходит за счет зацепления контактной линии за неровности.

Из рисунков 2.12в и 2.12г видно, что вид кривых, характеризующих охлаждение приповерхностного слоя бифильных поверхностей однотипен, но отличается от кривых, характеризующих охлаждение приповерхностного слоя поверхностей Polished и SHPhi (рисунок 2.12а), а также SHPho (рисунок 2.12б). В момент дозирования капли воды на бифильные поверхности температура поверхности уменьшается на  $\Delta T_{\max}$ , с течением времени перепад температуры уменьшается до  $\Delta T_{\text{av}}$ . Такое изменение температуры поверхности обусловлено тем, что при дозировании капли воды на бифильную поверхность, в области супергидрофильной части теплоноситель через систему взаимосвязанных микро- и наноразмерных полостей за счет капиллярных сил занимает область, превосходящую по размерам супергидрофильные кольца. С течением времени происходит, нагрев теплоносителя, содержащегося в микро- и наноразмерных полостях. Часть его испаряется, часть теплоносителя в полостях находится в состоянии насыщения. Рост температуры поверхности (перепад температуры уменьшается до  $\Delta T_{\text{av}}$ ) обусловлен тем, что микро- и наноразмерные полости не подпитываются теплоносителем из менее прогретых верхних слоев капли, наступает квазиравновесное состояние. Последнее длится до разрушения формы капли на завершающей стадии процесса испарения, сопровождающейся трансформацией линии трехфазного контакта из окружности в кривую Безье. Последнее увеличивает длину линии трехфазного контакта. Также, как и на полированной поверхности Polished, является причиной уменьшение температуры приповерхностного слоя на  $\Delta T_{\max}$  на завершающей стадии процесса испарения капли теплоносителя. Исключением является поверхность BiPhi1, поскольку на завершающей стадии испарения капли в результате разрушения парового пузыря на супергидрофобной области появляется сухое пятно (рисунок 2.11), вследствие чего поверхность нагревается.

Средние значения  $\Delta T$ , зарегистрированные в экспериментах, приведены в таблице 2.3. По значению достигнутого охлаждения приповерхностного слоя поверхности расположены (таблица 2.3) в последовательности от наибольшего (зарегистрировано на SHPhi) к наименьшему (SHPho).

Таблица 2.3 – Охлаждение приповерхностного слоя (на толщине 160 мкм) при испарении капли воды объемом 5 мкл

| Охлаждение приповерхностного слоя | Поверхность         | $\Delta T$ , °C                                       |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------|
| Высокое                           | SHPhi (II группа)   | $5,0 \pm 0,5$                                         |
| Умеренное                         | BiPhi4 (IV группа)  | средний: $1,5 \pm 0,3$<br>максимальный: 1,8 – 1,9     |
|                                   | BiPhi3 (IV группа)  | средний: $1,2 \pm 0,2$<br>максимальный: 1,6 – 1,7     |
|                                   | Polished (I группа) | средний: $1,2 \pm 0,2$<br>максимальный: $1,6 \pm 0,3$ |
|                                   | BiPhi2 (V группа)   | средний: $1,1 \pm 0,2$<br>максимальный: 1,3           |
|                                   | BiPhi1 (V группа)   | средний: $0,8 \pm 0,2$<br>максимальный: 1,1           |
| Низкое                            | SHPho (III группа)  | $0,5 \pm 0,1$                                         |

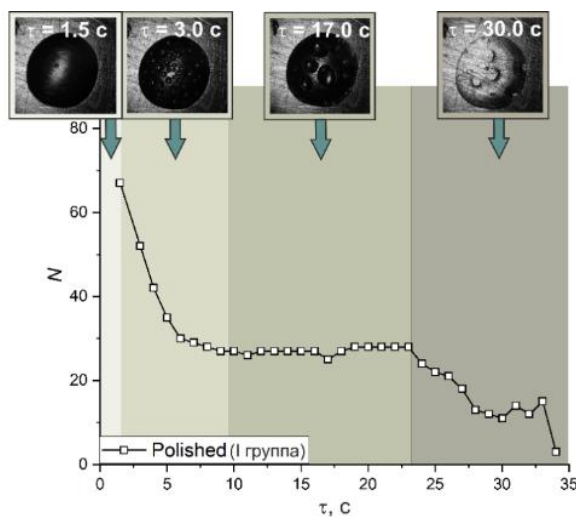
Умеренное охлаждение приповерхностного слоя зарегистрировано на Polished и бифильных поверхностях (таблица 2.3). Наибольшее охлаждение среди поверхностей, отнесенных к «умеренному охлаждению», продемонстрировали BiPhi4 поверхности с тремя супергидрофильными концентрическими кольцами (таблица 2.3). Наименьшее охлаждение зарегистрировано под каплей на BiPhi1 поверхности с экстремальной бифильностью (супергидрофобность / супергидрофильность). Последнее объясняется образованием парового пузыря на супергидрофобной области, а в следствие и сухого пятна.

Можно сделать вывод о том, что супергидрофильные свойства обеспечивают наибольшее охлаждение теплонагруженной поверхности. Бифильные поверхности с комбинацией экстремальных свойств смачивания (супергидрофильных / супергидрофобных) позволяют решить проблему локализации капель теплоносителей на теплонагруженных поверхностях. Однако по интенсивности испарения капель теплоносителей и, соответственно, охлаждению приповерхностного слоя предпочтительнее бифильные поверхности с комбинацией супергидрофильных / гидрофильных свойств смачивания. Но последнее в полной мере не решает проблему локализации капель теплоносителей на теплонагруженных поверхностях. С этих точек зрения будущими

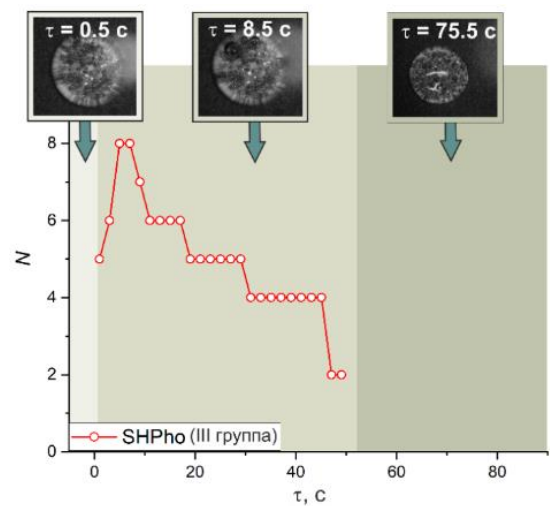
перспективными являются исследования по определению оптимальной конфигурации и расположения участков с различной степенью смачиваемости на бифильных поверхностях.

### 2.2.2.3 Анализ процесса нуклеации

Характер процесса нуклеации в капле в значительной степени определяется шероховатостью и свойствами смачивания поверхностей [80,81]. Динамика нуклеации в капле на поверхностях сплава АМг-2, нагретых до температуры 100 °С представлена на рисунке 2.13. Капли демонстрируют одинаковые характеристики фазового перехода в этом диапазоне температур, который можно классифицировать как режим пузырькового кипения. Используемая система видеорегистрации позволяла с высокой точностью регистрировать размеры пузырьков от 0,06 мм.



а)



б)

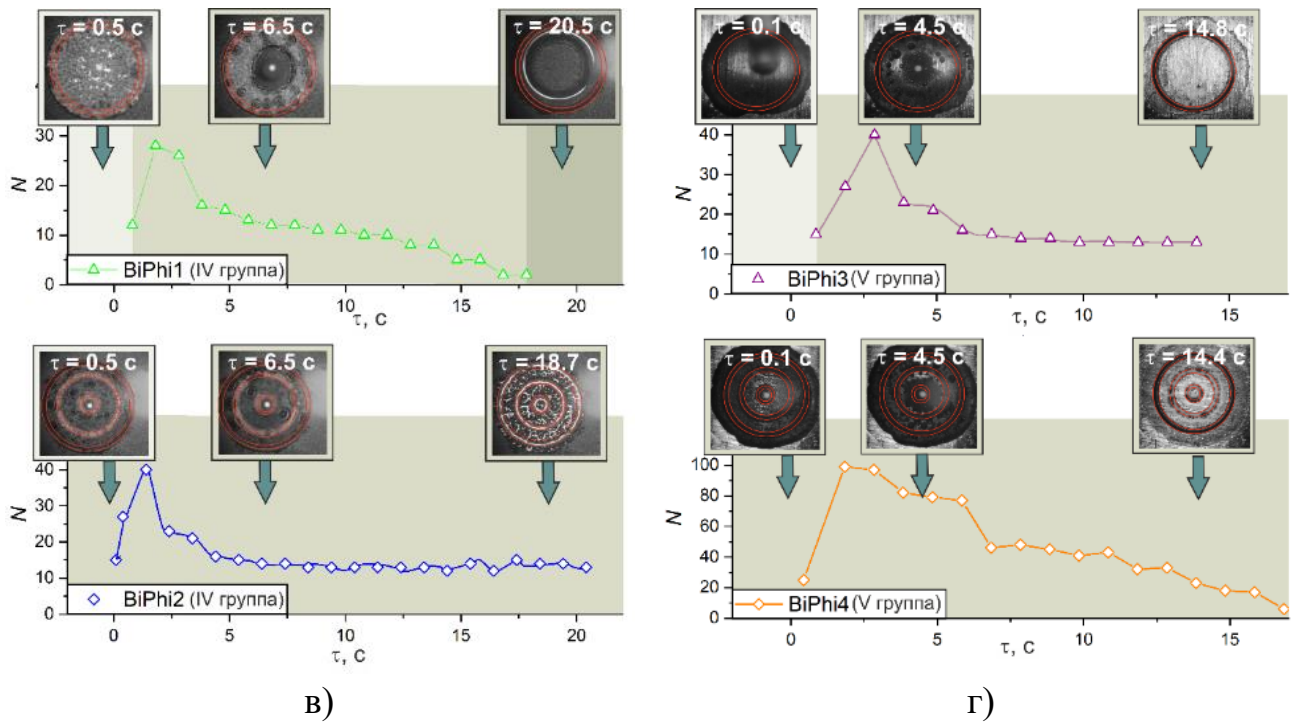


Рисунок 2.13 – Число пузырей, формирующихся в испаряющейся капле на поверхностях: а) Polished; б) SHPho; в) BiPhi1 и BiPhi2; г) BiPhi3 и BiPhi4

При помещении капли на нагретую поверхность на начальном этапе происходит прогрев жидкости, после чего начинается зарождение и рост пузырей на поверхности материала (гетерогенное кипение). Экспериментально зарегистрировано, что при дозировании капли на SHPho, а также на супергидрофобную часть поверхностей BiPhi1 и BiPhi2 на межфазной поверхности раздела «поверхность – жидкость» формируются «воздушные карманы». Последнее обусловлено состоянием Касси-Бакстера. Установлено, что на поверхностях Polished, BiPhi1 и BiPhi3 новые поровые пузыри зарождаются через 1,5; 0,5 и 0,1 с после дозирования капли, соответственно (рисунок 2.13). На поверхностях BiPhi2 и BiPhi4 (бифильные поверхности с тремя концентрическими кольцами) новые пузыри зарождаются быстрее, по прошествии 0,03 с с момента дозирования жидкости (разрешающая способность используемой системы видеорегистрации). Стоит отметить, что характерное время начала роста зарегистрированных «воздушных карманов» на супергидрофобной части поверхности больше (0,3 с), чем характерное время зарождения новых пузырей преимущественно на гидрофильной/супергидрофильной части поверхностей

(0,03 с). Последнее обусловлено тем, что рост воздушных карманов может осуществляться только при прогреве воздуха (с высоким термическим сопротивлением) в них до температуры насыщения воды (теплоносителя) окружающего их. Можно сделать вывод о том, что увеличение супергидрофильной площади на бифильных поверхностях интенсифицирует процесс зарождения новых паровых пузырей в условиях осаждения капли теплоносителя на нагретую поверхность до температуры насыщения теплоносителя. Необходимо отметить, что по известным результатам (в которых условия нагрева поверхности осуществляются в среде теплоносителя, имеющим ту же начальную температуру, что и поверхность нагрева, как правило, температура соответствующая лабораторным условиям 20 – 25 °С) зародышеобразование происходит быстрее на гидрофобных поверхностях, поскольку в субмикронных неровностях находится воздух [82]. Гидрофильные же поверхности способствуют улучшению «транспорта жидкости» и увеличению критического теплового потока [83].

На полированной поверхности в диапазоне времени испарения 1,5 – 9,5 с, формируется большое число пузырей относительно малого размера от 0,06 до 0,66 мм (рисунок 2.13а). Далее со временем, их число уменьшается, а размер увеличивается за счет коалисценции. В диапазоне времени испарения 9,5 – 23,0 с их число изменяется незначительно, а размер пузырей растет 0,26 – 0,9 мм (рисунок 2.13а).

На супергидрофобной поверхности (рисунок 2.13б) нуклеация происходит менее интенсивно. В диапазоне времени испарения до 5 с число пузырей растет и достигает наибольшего значения. Размеры пузырей 0,06 – 0,23 мм (рисунок 2.13б). Далее, со временем их число уменьшается ступенчато, пузыри разрушаются, новые не зарождаются. Максимальный размер пузырей 0,08 – 1,2 мм.

Известно [84], что центрами зарождения пузырей являются каверны (углубления) на поверхностях. По результатам проведенных экспериментов установлено, что бифильные поверхности демонстрируют интенсификацию кипения и высокую плотность образования пузырьков. Однако, на супергидрофобных областях формируются относительно большие пузырьки

(рисунок 2.13в): при времени испарения 0,5 – 17,0 с характерный размер от 0,07 до 0,18 мм, и при времени 17 – 30 с от 0,07 до 0,33 мм. На рисунке 2.13в (поверхность BiPhi2) в диапазоне времени испарения 0 – 20 с характерный размер пузырьков от 0,09 до 0,57 мм. На супергидрофильных участках бифильных поверхностей формируются очень мелкие пузыри, точный размер которых не позволяла зарегистрировать используемая система регистрации. На поверхности BiPhi3 в диапазоне времени испарения 0 – 0,1 с характерный размер пузырей от 0,07 до 0,25 мм, в диапазоне 0,1 – 15 с от 0,1 до 0,3 мм (рисунок 2.13д, BiPhi3). На поверхности BiPhi4 (рисунок 2.13д) размеры пузырей от 0,08 до 0,26 мм в диапазоне времени испарения 0 – 15,0 с. По результатам анализа процесса нуклеации в капле воды объемом 5 мкл, осажденной на модифицированные поверхности, нагретые до температуры кипения теплоносителя, можно сделать вывод о том, что не зависимо от режима испарения капли, число зарождений новых пузырьков уменьшается на завершающей стадии процесса испарения. Свойства смачиваемости, в том числе экстремальные (супергидрофильные / супергидрофобные), а также развитая, многомодальная шероховатость не повлияли на рост числа пузырей на завершающей стадии процесса испарения капли. Число зародышей пузырей связано с отводимым тепловым потоком от поверхности и, соответственно, с ростом скорости испарения капли. Чем больше новых зародышей пузырей и чем больше их размер, тем больше отводится теплоты от теплонагруженной поверхности. И тем выше скорость испарения. Так как в проведенных исследованиях зарегистрировано уменьшение числа зарождения новых пузырей на завершающей стадии процесса испарения капли можно сделать вывод о том, что паровые пузыри не являются основным значимым фактором, влияющим на характеристики охлаждения поверхности и роста скорости испарения на завершающей стадии испарения капли. Так как число зародышей уменьшается, то данный фактор влияет на уменьшение отводимой теплоты от теплонагруженной поверхности и снижения скорости испарения. Также можно сделать вывод о том, что прирост площади поверхности за счет шероховатости и длина линии трехфазного контакта (анализ их влияния проведен выше) являются

более значимыми факторами, чем число паровых пузырей, влияющими на характеристики охлаждения нагретой поверхности и характеристики испарения капли теплоносителя на завешающей стадии.

#### **2.2.2.4 Скорости конвективных потоков в испаряющейся капле**

Анализ влияния характеристик модифицированных поверхностей лазерным излучением на интенсивность процессов испарения и нуклеации также проводился на основе полученных полей скоростей конвективных потоков в испаряющейся капле. Полученные поля скоростей позволяют идентифицировать возникающие завихрения. Представленные поля скоростей получены внутри капли в сечении вблизи поверхности раздела «жидкость/газ». Также по результатам проведенных исследований получена динамика двухкомпонентного вектора скорости (средние и максимальные) в процессе испарения капли (от момента размещения ее на поверхности до полного испарения).

На рисунке 2.14 типичные мгновенные двухкомпонентные регулярные поля скоростей конвективных потоков в капле воды при испарении на исследуемых поверхностях. Для каждого случая испарения капля на полированной, SHPho и бифильной поверхностях представлены три типичных изображения полей скоростей: начальная стадия испарения (0–1,5 с для полированной и бифильной поверхностей; 0–15 с для SHPho); промежуточная стадия испарения (1,5–10 с для Polished, BiPhi2, BiPhi3, BiPhi4; 1,5–17,7 с для BiPhi1, 15–95 с для SHPho); конечная стадия испарения (10–24,8 с для Polished; 95–104 с для SHPho, 17,7–29,5 с для BiPhi1; 10–19,3 с для BiPhi2; 10–15 с для BiPhi3; 10–14,6 с для BiPhi4).

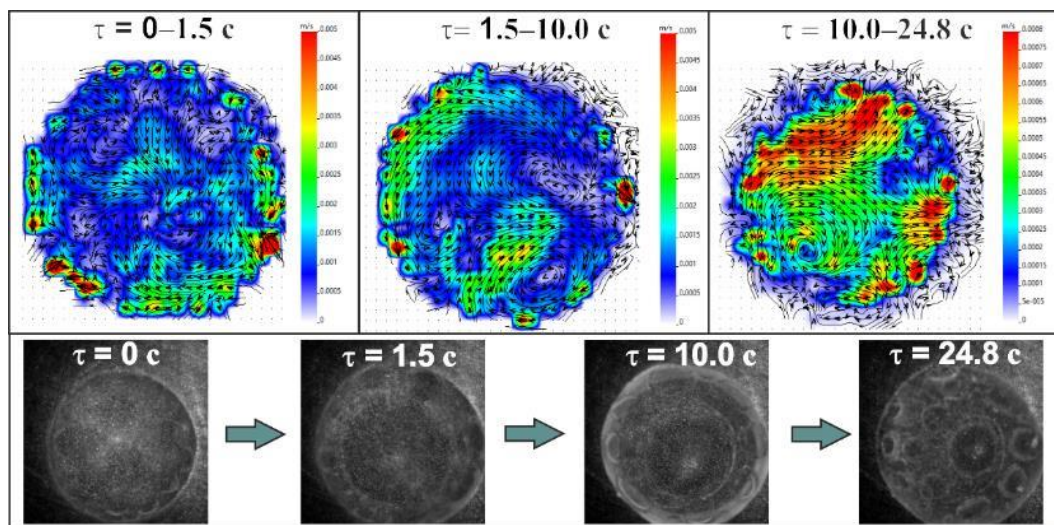
На полированной поверхности в диапазоне 0 – 1,5 с конвективные потоки в капле направлены от ее периферии к центру. Полученная картина векторов у вершины капли (появление внутренних завихрений) может быть вызвана:

- конвекция Рэлея, вызванная подъемной силой (жидкость в центре капли движется вверх, а жидкость на границе раздела движется вниз, создавая циркуляционную петлю внутри капли), объясняющаяся тем, что на вершине капли

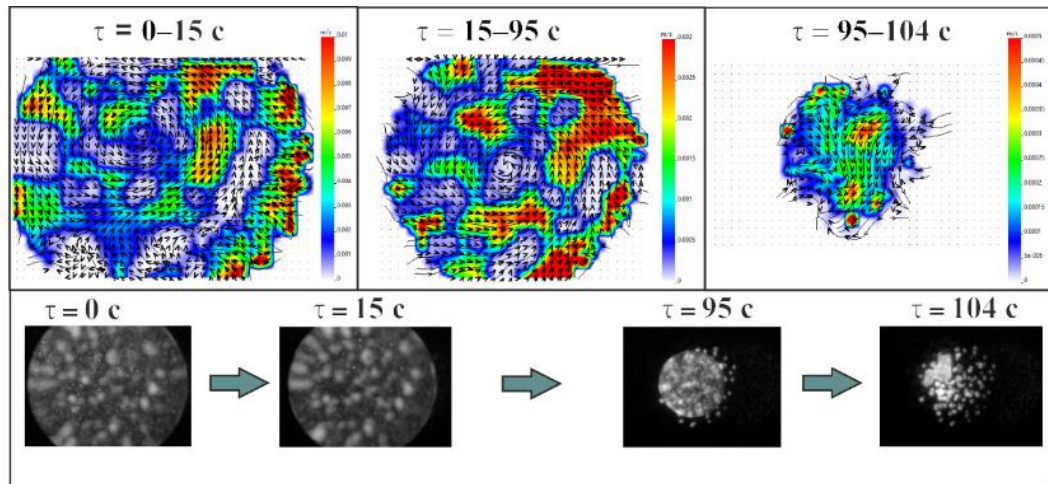
формируется область с низкой температурой, вблизи контактной линии – область высокой температуры за счет нагретой твердой поверхности. Нагретая вода из-за разности температур начинает двигаться вверх в центре капли из-за низкой плотности, а холодная вода – вниз, чтобы пополнить жидкость снаружи. Таким образом, внутренний поток вдоль границы раздела осуществлялся сверху вниз;

– поток Марангони, приводящий к переносу вещества вдоль границы раздела двух сред, обусловленный наличием градиента поверхностного натяжения из-за разницы температур (температура жидкости выше в области линии трехфазного контакта, чем на вершине капли). Т.е. более нагретая вода с меньшим поверхностным натяжением затягивается менее нагретой водой сначала к вершине капли, а затем вниз к ее центру.

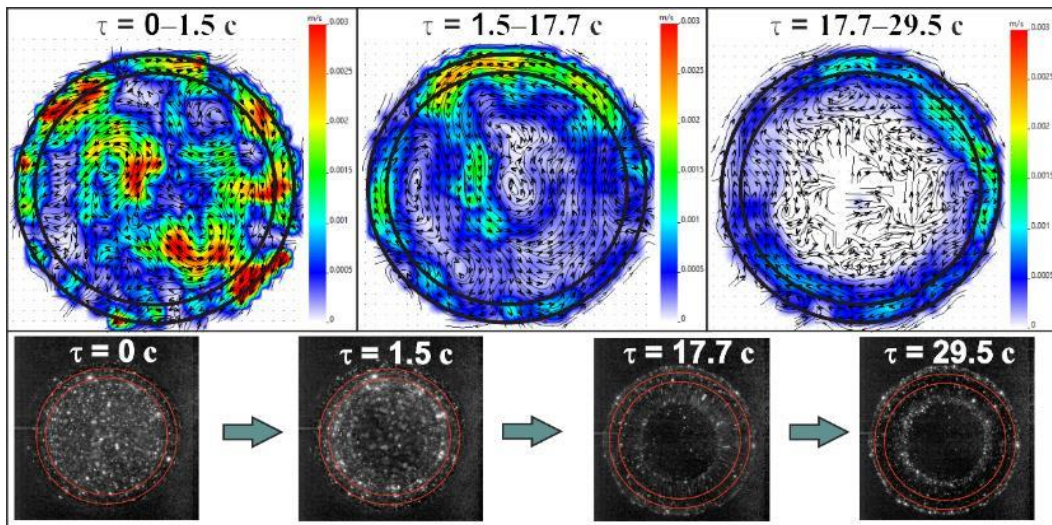
Согласно [85] для каплей радиусом 0,3 – 7,0 мм, определяющим является поток Марангони. В проведенных экспериментах радиус капли находился в диапазоне 0,5 – 1,8 мм. Начиная с 1,5 секунды в капле активно появляются крупные паровые пузыри, начинается интенсивное кипение, вследствие чего картина конвективных потоков нарушается (непрогнозируемая вихревая картина). Вблизи поверхности капли появляются три завихрения конвективных потоков. Сравнивая изображения конвективных потоков в диапазоне 1,5 – 10 с и 10 – 24,8 с можно увидеть, что завихрения перемещаются по часовой стрелке по поверхности капли.



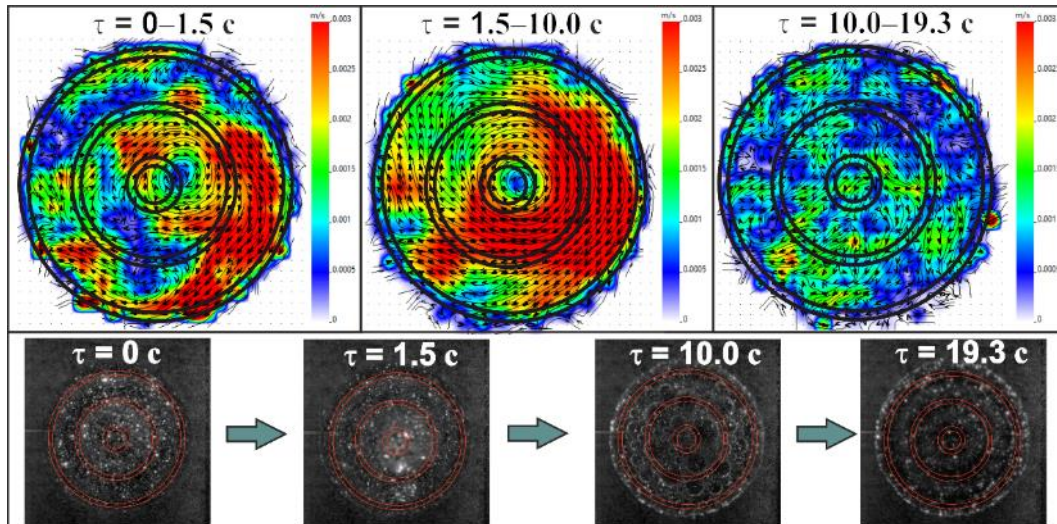
a)



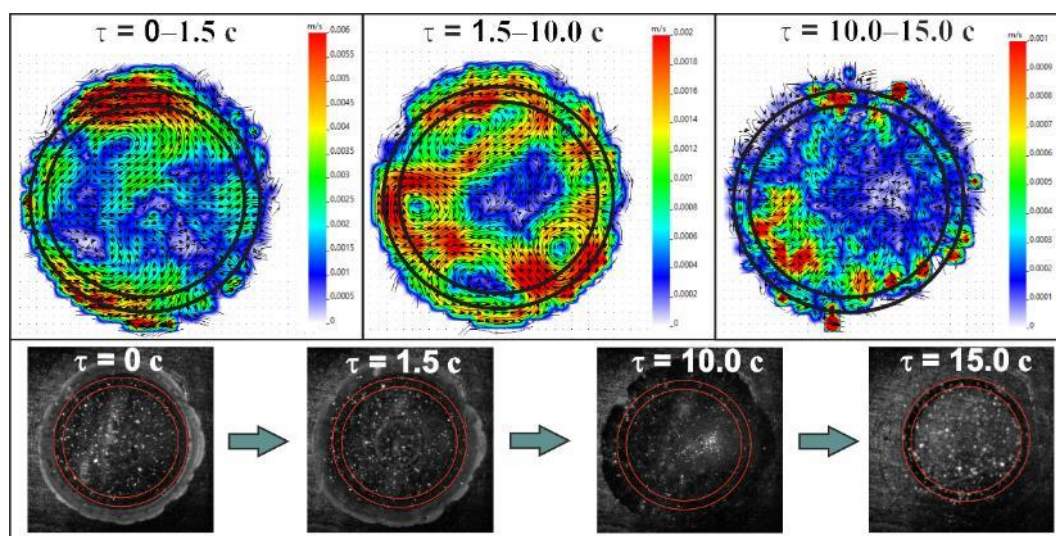
6)



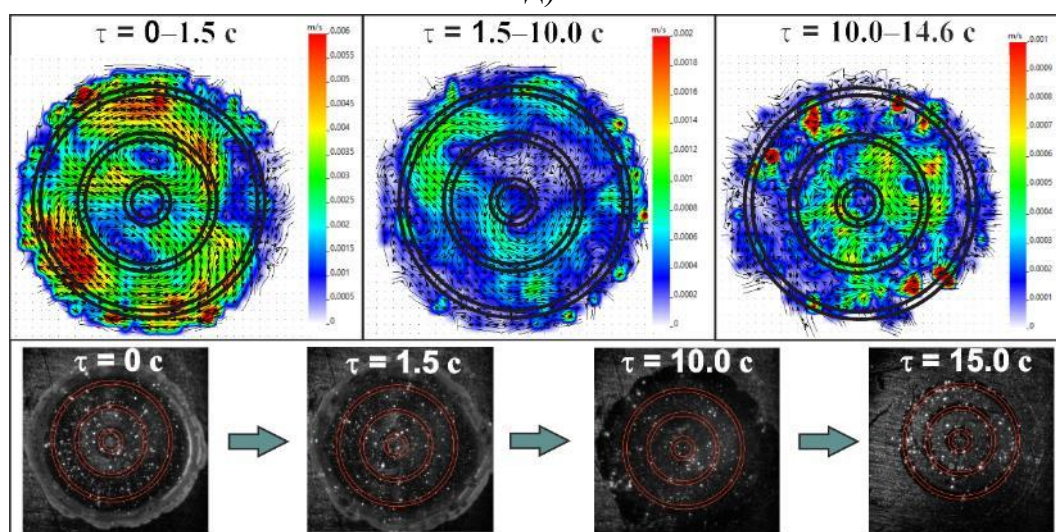
B)



r)



д)



е)

Рисунок 2.14 – Типичные поля скоростей в испаряющихся каплях, полученные методом micro-PIV, на поверхностях: а) Polished; б) SHPho; в) BiPhi1; г) BiPhi2; д) BiPhi3; е) BiPhi4

На гидрофобной поверхности (рисунок 2.14б) в диапазоне 0 – 95,0 с конвективные потоки направлены по кругу против часовой стрелки, образуя один большой вихрь в центре капли. На завершающей стадии испарения, когда размер капли очень мал, потоки направлены от одной границы капли к другой.

При испарении капли на бифильной поверхности BiPhi1 с комбинацией экстремальных свойств смачивания и одним кольцом на поверхности капли формируется три вихря в начальный период испарения (0 – 1,5 с, рисунок 2.14в). С течением времени вода в капле прогревается, кипение становится более

интенсивным, и 1,5 с в центре формируется паровой пузырь, занимающий практически всю супергидрофобную область. Далее пузырь разрушается, образуя сухое пятно на поверхности (17,7 – 29,5 с, рисунок 2.11, рисунок 2.13в).

На бифильной поверхности BiPhi2 вначале процесса испарения формируется три вихря на поверхности капли,двигающиеся по часовой стрелке (0 – 1,5 с, рисунок 2.14г). В диапазоне с 1,5 по 10,0 с конвективные потоки направлены по кругу по часовой стрелке, образуя один большой вихрь в центре капли (рисунок 2.14г). С 10-й секунды интенсивное кипение разрушает образовавшийся вихрь.

На бифильных поверхностях с комбинацией гидрофильных и супергидрофильных свойств смачивания BiPhi3 и BiPhi4 (рисунок 2.14д, рисунок 2.14е) структура полей скоростей конвективных потоков подобны друг другу. В диапазоне 0 – 1,5 с на поверхности капли формируется два вихря, далее с увеличением прогрева капли (1,5 – 10 с) число завихрений увеличивается до 5 – 6. Начиная с 10 секунды от момента размещения капли интенсивное кипение разрушает структуру конвективных потоков.

Эволюция средней и максимальной скоростей конвективных потоков в капле воды на исследуемых поверхностях приведены на рисунке 2.15. Анализ динамики двухкомпонентного вектора скорости (средний и максимальный) в процессе испарения капли на исследуемых поверхностях показал, что в начале процесса испарения скорости конвективных потоков максимальны (рисунок 2.15). Это связано с тем, что в этот период имеет место наибольший градиент температуры по высоте капли от межфазной поверхности капля/твердое тело до поверхности капля/воздух. Со временем капля прогревается, градиент уменьшается, а скорость снижается. Однако, на BiPhi1 характер изменения скорости потоков в капле другой. В начальный период испарения скорость растет, потом выходит на плато, и в конце снижается. Большее значение скорости конвективных потоков на SHPho по сравнению с полированной в начальный период испарения объясняется большей высотой капли на поверхности с супергидрофобными свойствами, следовательно, прогревается капля медленнее, из-за чего градиент температуры по высоте капли

будет больше. Экстремумы кривых (рисунок 2.15) указывают на кипение (возникновение пузырей).

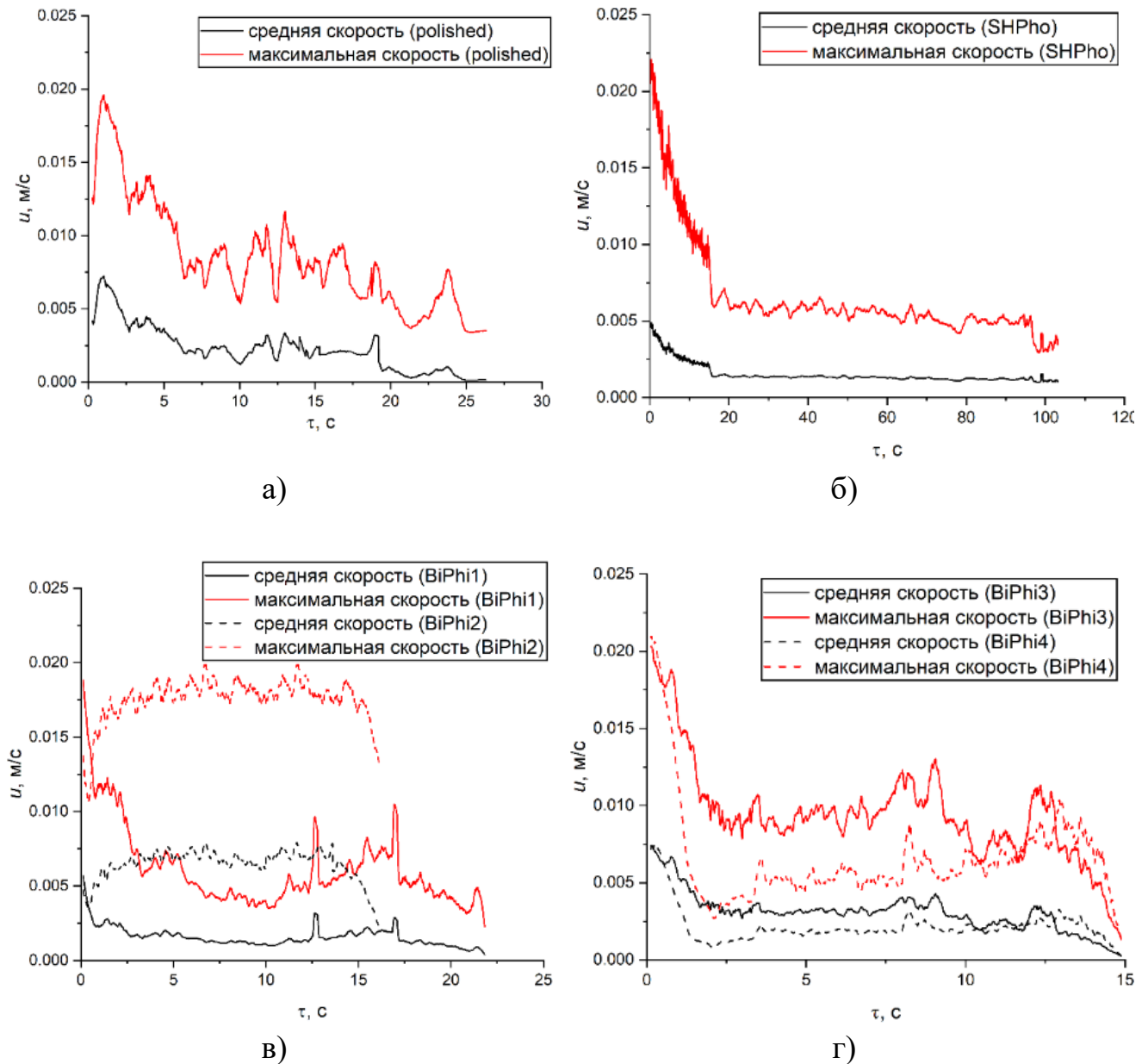


Рисунок 2.15 – Эволюция средней и максимальной скоростей конвективных потоков в капле воды, помещенной на поверхность, нагретой до  $T = 100^\circ\text{C}$ : а) полированная (I группа); б) SHPho (III группа); в) BiPhi1 и BiPhi2 (IV группа); г) BiPhi3 и BiPhi4 (V группа)

По результатам анализа скоростей конвективных потоков в испаряющейся капле можно сделать вывод о том, что дизайн бифильных поверхностей, расположение участков с различной смачиваемостью по отношению друг к другу,

их геометрическая конфигурация существенно влияют на формирование конвективных потоков в испаряющейся капле, в частности на число завихрений и характерные значения скоростей потоков. С целью увеличения скоростей конвективных потоков в испаряющейся капле предпочтительнее на практике использовать бифильные поверхности с комбинацией экстремальных свойств смачиваемости. При необходимости увеличения числа завихрений наилучшие характеристики будут демонстрировать бифильные поверхности с комбинацией свойств гидрофильности и супергидрофильности.

## Выводы по главе 2

По результатам проведенных экспериментальных исследований процессов испарения и кипения капли воды на поверхностях с различными свойствами смачивания (гидрофильная полированная, супергидрофильная и супергидрофобная с развитой иерархической текстурой, бифильные с комбинацией свойств смачивания гидрофильность / супергидрофильность, бифильные с комбинацией экстремальных свойств смачивания супергидрофобность / супергидрофильность) получены следующие выводы:

1. По результатам анализа методом микроскопии поверхностей в высоком разрешении (более  $\times 400000$ ) установлено, что гидрофобизация углеводородными загрязнениями поверхностей модифицированных лазерным излучением происходит преимущественно по механизму хемосорбции. Однако исключать и значительную составляющую физической адсорбции нельзя, так как углеводородные загрязнения могут быть размером меньше возможностей регистрации текстуры электронным сканирующим микроскопом.

2. Комбинация гидрофильных ( $\theta_0 = 87,8^\circ$ ) и супергидрофильных ( $\theta_0 = 0^\circ$ ) свойств на бифильных поверхностях более предпочтительна по сравнению с комбинацией экстремальных свойств смачивания (супергидрофильных ( $\theta_0 = 0^\circ$ ) и супергидрофобных ( $\theta_0 = 152,5^\circ$ )) на бифильных поверхностях нагрева для интенсификации процессов испарения малых объемов теплоносителей при температурах, характерных началу формированию паровой фазы.

3. Выбор дизайна (конфигурации и расположения) поверхности, участки которой демонстрируют различные свойствами смачивания, оказывает влияние не только на интенсивность испарения теплоносителя, но в случае экстремальных свойств смачивания на бифильных поверхностях, является основным фактором формирования сухих пятен за счет разрушения паровых пузырей на супергидрофобной части поверхности.

4. На бифильных поверхностях с комбинацией гидрофильных (полированные участки) и супергидрофильных (концентрические кольца, полученные

текстурированием лазерным излучением) свойств режимы испарения капель теплоносителей и их последовательность подобны аналогичным характеристикам на полированных гидрофильных поверхностях металлов. Комбинация гидрофильных и супергидрофильных свойств на бифильных поверхностях в сравнении с полированными поверхностями металлов значительно влияет на длительность режимов испарения. На бифильных поверхностях длительность «пиннинга» (режим постоянного диаметра) на 30 – 40 % меньше, чем на полированных, и, соответственно, продолжительность смешанного режима испарения больше.

5. Установлено, что на завершающей стадии процесса испарения капли теплоносителя основным фактором, влияющим на рост скорости испарения и количества теплоты, отводимой от поверхности (снижения температуры поверхности) влияет увеличение длины линии трех фазного контакта.

6. Проведенные эксперименты показали, что формирование с заданными размерами концентрических супергидрофильных колец на супергидрофобной поверхности позволяет управлять режимами испарения капель, с высокой точностью контролировать контактный диаметр капли в режиме испарения «пиннинга». Последнее является решением актуальной проблемы в системах спреевого (капельного) охлаждения, заключающейся в нестабильной локализации капель на теплонагруженной охлаждаемой поверхности.

7. С целью увеличения скоростей конвективных потоков в испаряющейся капле предпочтительнее на практике в системах капельного орошения использовать бифильные поверхности с комбинацией экстремальных свойств смачиваемости. При необходимости увеличения числа завихрений наилучшие характеристики будут демонстрировать бифильные поверхности с комбинацией свойств гидрофильности и супергидрофильности.

### **ГЛАВА 3. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ**

В третьей главе приведены результаты разработки нового подхода по уменьшению адгезионного контакта продуктов горения на поверхностях теплообмена и уменьшению негативных последствий формирования шлака. Разработанный подход основан на модификации теплопередающих поверхностей энергогенерирующего оборудования для формирования приповерхностного слоя, характеризующегося повышенной стойкостью к осаждению продуктов горения топлив и шлакованию.

В главе представлены результаты экспериментальных исследований и натурных испытаний по оценке стойкости теплопередающих поверхностей нагрева, модифицированных лазерным излучением, к осаждению продуктов горения твердого топлива и шлакованию.

#### **3.1 Экспериментальные исследования**

Приведено описание разработанной экспериментальной установки и методики проведения экспериментальных исследований. Описана методика модификации лазерным излучением приповерхностного слоя стали 20Х23Н18. Приведены результаты анализа стадий трансформации зольной смеси, расположенной на теплопередающей поверхности, характеристик шлакования поверхностей металлов, элементного химического состава и микротекстуры поверхностей стали до и после проведения экспериментов по шлакованию.

### 3.1.1 Экспериментальная установка и методы исследования

#### 3.1.1.1 Приготовление модельного состава золы

В промышленных котлах образование шлака зависит от множества факторов (например, свойств топлива, температурного режима, химической активности добавок и т.д.) [50]. В настоящей работе [86] для проведения экспериментов подготавливалась смесь, имитирующая компонентный состав золы, образующейся при сжигании твердого органического топлива (индивидуально или в составе топливной смеси). Необходимость использования модельного состава обусловлено двумя основными причинами: 1) ограничения лабораторного оборудования, которые не позволяют получить необходимое количество зольного состава при сжигании топлива; 2) необходимость использования зольного состава с постоянными свойствами для исключения неопределенности (влияния неконтролируемых колебаний химического состава на регистрируемые характеристики).

В настоящем исследовании зольная смесь подготавливалась по методике, описанной в [87]. Смесь состоит из четырех компонентов (рисунок 3.1): оксида кальция (37,0 % по масс.), оксида железа (23,7 % по масс.), диоксида кремния (20,4 % по масс.) и оксида алюминия (18,9 % по масс.) [87].

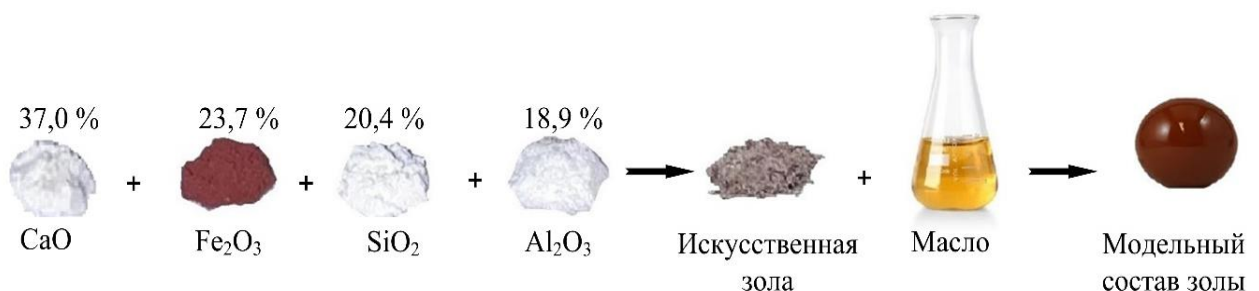


Рисунок 3.1 – Схема приготовления модельного состава золы

Смесь такого модельного состава является типичной синтетической золой [87]. Для приготовления синтетической зольной смеси использовались следующие порошки оксидов: SiO<sub>2</sub> (средний размер частиц 40 мкм и чистотой

99,0 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (чистотой 99,2 %, EuroChem Group AG, Россия),  $\text{CaO}$  (чистотой 97,0 %, EuroChem Group AG, Россия), и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (средний размер частиц 40 мкм и чистотой 99,0 %, EuroChem Group AG, Россия). Компоненты смешивали и измельчали вручную с помощью ступки и пестика до получения однородного состава. Перед нанесением на поверхность стали порошок смешивался с турбинным маслом (Газпромнефть, Россия) соотношением 60 : 40 % по массе. Это было необходимо для ограничения пыления зольной смеси, обеспечения ее постоянной начальной массы, а также для имитации капли минерального шлакообразующего вещества в форме сферы.

### **3.1.1.2 Оборудование и методика обработки поверхностей стали**

В работе использовались поверхности жаропрочной жаростойкой стали 20Х23Н18, с размерами 10,0×10,0×2,0 мм. Каждая поверхность подвергалась полировке по хорошо апробированной методике [88]. На полированных поверхностях сформирована текстура путем лазерной модификации с использованием иттербиевого наносекундного импульсного волоконного лазера (IPG-Photonics, Россия) с длиной волны 1064 нм. Выбраны следующие параметры лазерного излучения для обработки поверхностей: энергия импульса 0,944 мДж, выходная мощность 50 Вт, частота импульса 50 кГц, длительность 120 нс. Для создания текстур с различными конфигурациями, рассчитывались скорость линейного перемещения  $V$  и число проходов луча лазера  $n$  на 1 мм по методике, аналогичной в [57,67,89]. Эти параметры контролировались при помощи двухосевого гальванометрического сканатора на базе привода «Cambridge Technology» VM2500+, входящего в устройство лазерной системы.

Выбраны следующие конфигурации текстур согласно ранее проведенным исследованиям [90]:

- Параллельные микроканалы типа 1 (далее «Микроканалы № 1»);
- Параллельные микроканалы типа 2 (далее «Микроканалы № 2»);
- «Микростолбики»;

– Анизотропная с 95 % перекрытием абляционных кратеров (далее «Анизотропная»).

В таблице 3.1 приведены скорости линейного перемещения и числа проходов луча лазера для каждой конфигурации текстуры, рассчитанные по формулам:

$$V = d_{кр} \cdot x_v \cdot f, \quad (3.1)$$

где  $d_{кр}$  – диаметр абляционного кратера, сформированного однократным лазерным импульсом с параметрами, представленными выше (для жаропрочной жаростойкой стали  $d_{кр} = 87,6 \pm 2$  мкм), мкм;  $x$  – относительное расстояние между центрами соседних абляционных кратеров, используемое при расчете скорости линейного перемещения луча лазера ( $x_v = l/d_{кр}$ );  $l$  – расстояние между центрами соседних абляционных кратеров, мкм;  $f$  – частота лазера, кГц.

Число проходов лазера  $n$  вычислялось по формуле:

$$n = \frac{1}{x_n \cdot d}, \quad (3.2)$$

где  $x_n$  – относительное расстояние между центрами соседних абляционных кратеров, используемое при расчете числа линий прохода луча лазера ( $x_n = l/d_{кр}$ ).

Таблица 3.1 – Параметры, характеризующие перемещение лазерного луча гальванометрическим сканатором.

| Конфигурация текстур | $V$ , мм/с | $n$ , мм <sup>-1</sup> | $x_v$ | $x_n$ |
|----------------------|------------|------------------------|-------|-------|
| Микроканалы № 1      | 290        | 8,6                    | 0,066 | 1,32  |
| Микроканалы № 2      | 438        | 5,7                    | 0,1   | 2,0   |
| Микростолбики        | 324        | 3,8                    | 0,074 | 2,97  |
| Анизотропная         | 219        | 228,3                  | 0,05  | 0,05  |

Текстуры «Микроканалы № 1», «Микростолбики» и «Анизотропная» сформированы в условиях однократного, а текстура «Микроканалы № 2» – в условиях четырехкратного (повторного) прохождения луча с заданными характеристиками (таблица 3.1) по поверхности.

В качестве референтной поверхности стали применялась поверхность, обработанная абразивными материалами (полированная).

### **3.1.1.3 Методы и методики исследования поверхностей стали и шлака**

Методом сканирующей электронной микроскопии с использованием микроскопа TESCAN VEGA 3 LMN (TESCAN, Чехия) в режиме работы ускоряющего напряжения 5,0 кВ исследовалась микротекстура поверхностей до и после проведения экспериментов. При более высоком ускоряющем напряжении наблюдалась деградация образцов. При исследовании в режиме сканирования в высоком разрешении зарегистрирован высокий заряд модифицированных лазерным излучением поверхностей, что не характерно для сталей. Проблема снятия напряжения с поверхности решена путем нанесения по периметру образца стали коллоидного графита (Pelco Colloidal Graphite). Элементное картирование, а также весовой состав химических элементов поверхностей до и после проведения экспериментов по шлакованию определены с помощью детектора обратно отражённых электронов BSE, установленного на микроскопе TESCAN VEGA 3. Весовой состав химических элементов усреднялся по результатам трех измерений в аналогичных локальных областях. Разброс значений не превышал 1,5 %.

### **3.1.1.4 Экспериментальная установка**

Рисунок 3.2 иллюстрирует схему экспериментальной установки, которая применялась для исследования характеристик шлакования поверхностей металлов. Основным элементом установки являлся индукционный нагреватель (мощность 15 кВА, диапазон частот 30 – 100 кГц). Поверхность стали помещалась в рабочую зону индукционного нагревателя, т.е. во внутреннюю часть медной индукционной катушки (внутренний диаметр изгиба 30 мм). Поверхность располагалась на диэлектрической керамической платформе. После включения установки катушка

индуцировала переменное электромагнитное поле. Таким образом, установка позволяла нагревать поверхность металла до 1800 °С вихревыми индукционными токами. Охлаждение силовых элементов индукционного нагревателя выполнял чиллер с холодопроизводительностью 2,8 кВт и температурой в водяном контуре 5 – 35 °С. Образец золы в форме сферы помещался на поверхность стали с температурой, соответствующей лабораторным условиям (20 – 25 °С). После помещения зольного остатка поверхность нагревалась индукционным нагревателем. В таких условиях поверхность стали являлась источником нагрева золы, расположенной на ней. Высокотемпературный нагрев осуществлялся до полного перехода золы в жидкое агрегатное состояние.

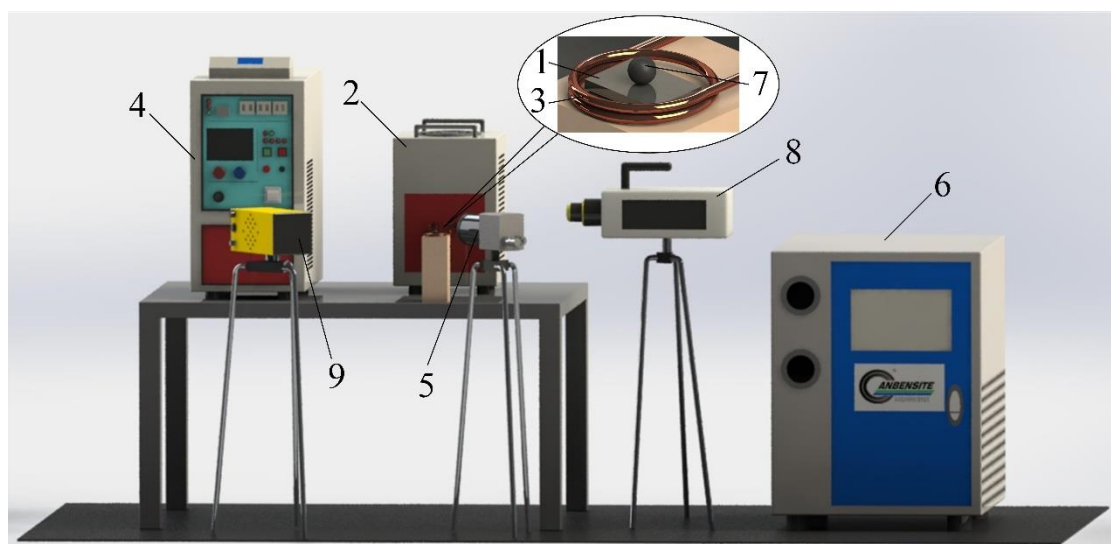


Рисунок 3.2 – Экспериментальная установка для исследования характеристик шлакования поверхностей металлов: 1 – поверхность; 2 – индукционный нагреватель; 3 – спираль индуктора; 4 – блок-регулятор; 5 – тепловизор; 6 – чиллер; 7 – зольная смесь в форме сферы; 8 – высокоскоростная видеокамера; 9 – светодиодный прожектор

Поддержание температуры поверхности стали выполнялось с помощью блока-регулятора. Измерение температуры в рабочей области осуществлялось бесконтактно с помощью инфракрасной камеры (характеристики прибора – диапазон измеряемых температур 525–1800 °С, погрешность измерения не

более  $\pm 2$  % показаний, температурная чувствительность не менее 4 К, разрешение 764×480, Optris, Германия).

Рабочая зона экспериментальной установки освещалась светодиодным прожектором. Перед помещением зольной смеси на поверхность стали включалась высокоскоростная видеокамера (Phantom V411, Vision Research, США). Масса зольной смеси, помещаемой на поверхность, составляла  $0,02 \pm 0,001$  г, средний диаметр составлял 2,5 мм. Измерение массы осуществлялось на аналитических весах Vibra AF 225DRCE (дискретность  $10^{-6}$  г). Контроль исходного размера образца зольной смеси выполнялся путем анализа начальных кадров видеосъемки с помощью программы Phantom Camera Control и опции Measurement.

Экспериментальные данные (видеограммы) записывались в память персонального компьютера. Тепловизионная съемка и высокоскоростная видеозапись синхронизировались с помощью программного обеспечения, позволяющего в режиме реального времени регистрировать моменты начала и окончания эксперимента, а также промежуточные характеристики процесса плавления золы.

В таблице 3.2 представлены характерные времена процесса и соответствующие им температуры поверхности стали, регистрируемые в экспериментах. На рисунке 3.3 приведена иллюстрация типичных регистрируемых процессов.

Таблица 3.2 – Регистрируемые процессы и соответствующие им характеристики

|   | Регистрируемый процесс                             | Характерное время (с) | Температура поверхности стали | Критерий (признаки, регистрируемые по видеозаписи эксперимента) |
|---|----------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1 | Кипение масла (начало затвердевания зольной смеси) | $\tau_1$              | $T_1$<br>(по данным [91])     | Кипение масла поверхности раздела «сталь – зольная смесь»       |
| 2 | Начало формирования парогазовой смеси              | $\tau_2$              | $T_2$<br>(по данным [91])     | Появление видимых продуктов испарения масла («дымление»)        |

*Продолжение таблицы 3.2*

|   |                                                        |          |       |                                                                                                                      |
|---|--------------------------------------------------------|----------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3 | Завершение затвердевания зольной смеси                 | $\tau_3$ | $T_3$ | Изменение цвета с бурого на серый всей поверхности образца золы                                                      |
| 4 | Завершение формирования парогазовой смеси              | $\tau_4$ | $T_4$ | Прекращение видимого выделения паров масла                                                                           |
| 5 | Зажигание паров масла                                  | $\tau_5$ | $T_5$ | Вспышка паров                                                                                                        |
| 6 | Завершение выгорания паров масла                       | $\tau_6$ | $T_6$ | Исчезновение пламени                                                                                                 |
| 7 | Начало формирования шлака (плавление зольного состава) | $\tau_7$ | $T_7$ | Формирование жидкого расплава по периметру соприкосновения с поверхностью стали и уменьшение высоты зольного образца |
| 8 | Завершение формирования шлака                          | $\tau_8$ | $T_8$ | Весь объем золы трансформировался в жидкий расплав                                                                   |

Начало затвердевания золы, сопровождающееся вскипанием масла, и начало формирования парогазовой смеси реализовывались при температурах поверхности стали, не входящих в диапазон измерения тепловизионной камеры (т.е. значения  $T_1$  и  $T_2$  были ниже 525 °С). Поэтому значения  $T_1$  и  $T_2$  принимались по известным [91] характеристикам для турбинного масла (горючего компонента, входящего в состав модельной смеси).

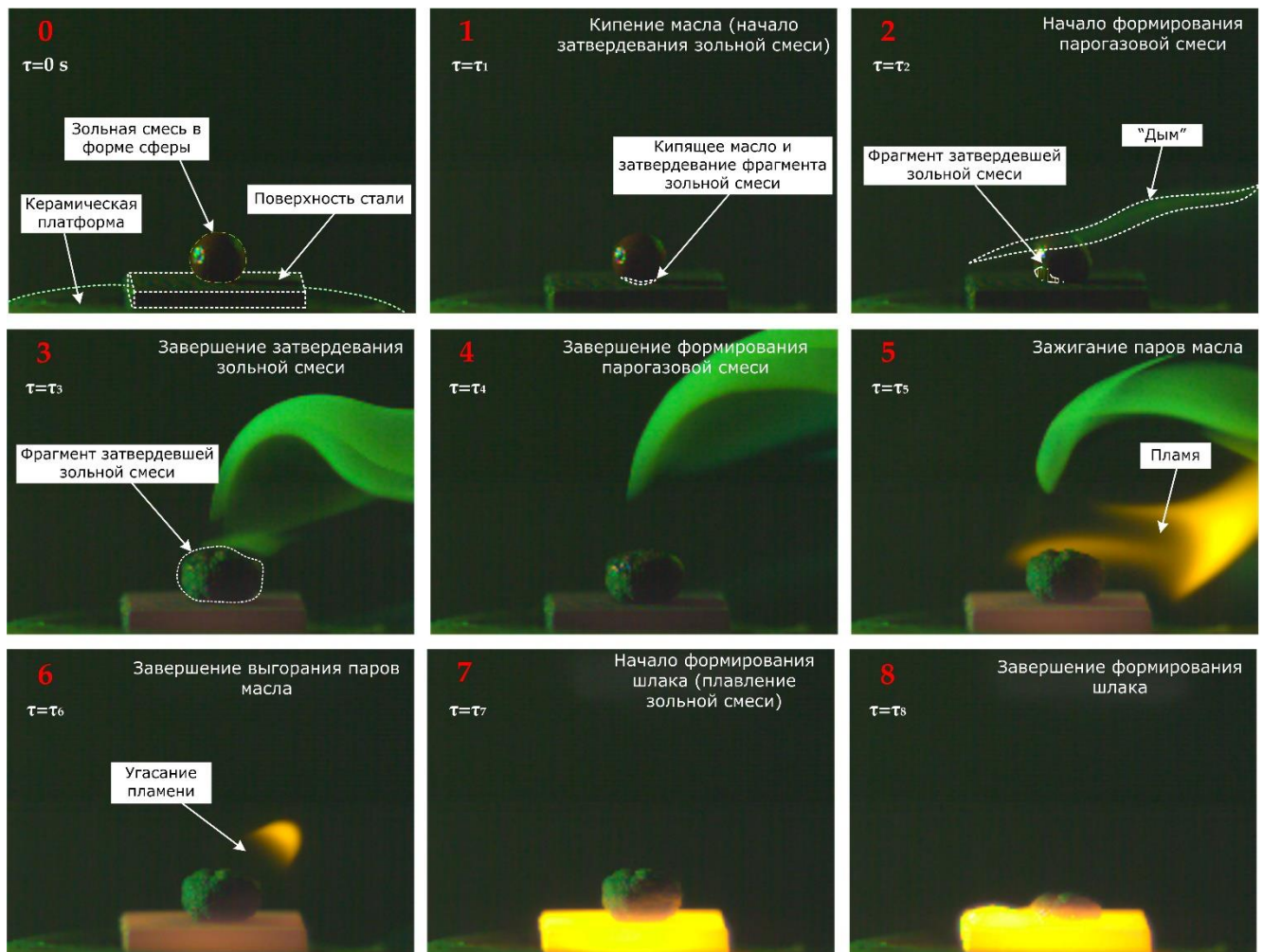


Рисунок 3.3 – Типичные видеокадры процессов (стадий), протекающих при нагреве зольной смеси

Критерием регистрации начала изменения агрегатного состояния являлось кипение масла на поверхности раздела «сталь – зола» (рисунок 3.3). Критерием регистрации начала формирования парогазовой смеси являлось выделение газа, различимого на видеозаписи (рисунок 3.3). Критерием регистрации завершения изменения агрегатного состояния (полного затвердевания золы) являлось изменение цвета с бурого на серый по всей видимой поверхности образца. Зажигание паров масла регистрировалось по появлению видимого пламени [92,93]. По завершению выгорания паров начиналось плавление синтетической зольной смеси. Критерием начала этого процесса являлось формирование жидкого расплава по периметру соприкосновения с поверхностью металла и уменьшения высоты

образца золы. Плавление золы считалось завершившимся, когда он полностью трансформировалась в жидкий расплав.

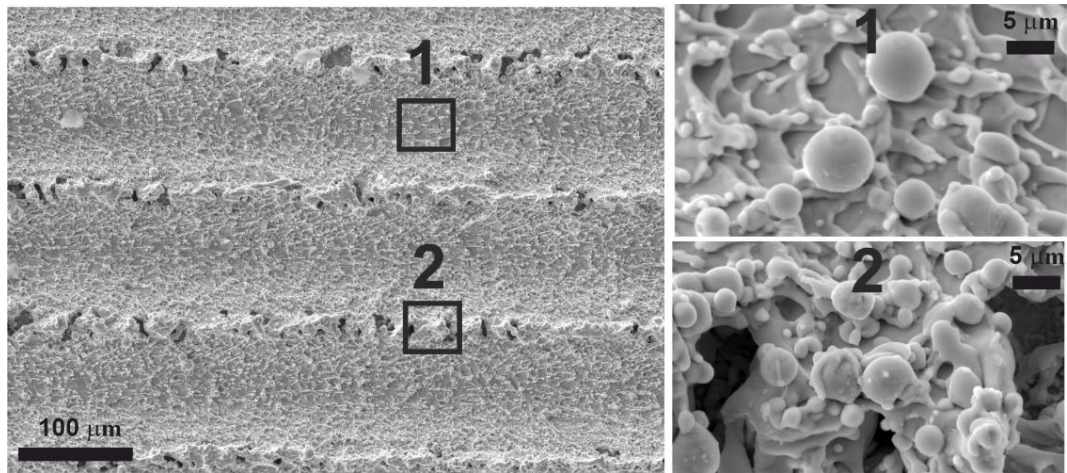
Каждая серия экспериментов повторялась многократно (не менее 5 раз) при идентичных условиях. Результаты обрабатывались в соответствии с классическими статистическими подходами [94]. В частности, грубые ошибки исключались, результаты многократных измерений усреднялись, вычислялся коэффициент вариации, среднеквадратичное отклонение и ширина доверительного интервала при доверительной вероятности 95 %.

Отличия экспериментальных условий от реальных условий формирования шлака в энергогенерирующем оборудовании (избыток воздуха, температура окружающей среды, размер и концентрация частиц, формирующих золошлаковый слой) подобны известным исследованиям и обусловлены техническими ограничениями экспериментального оборудования.

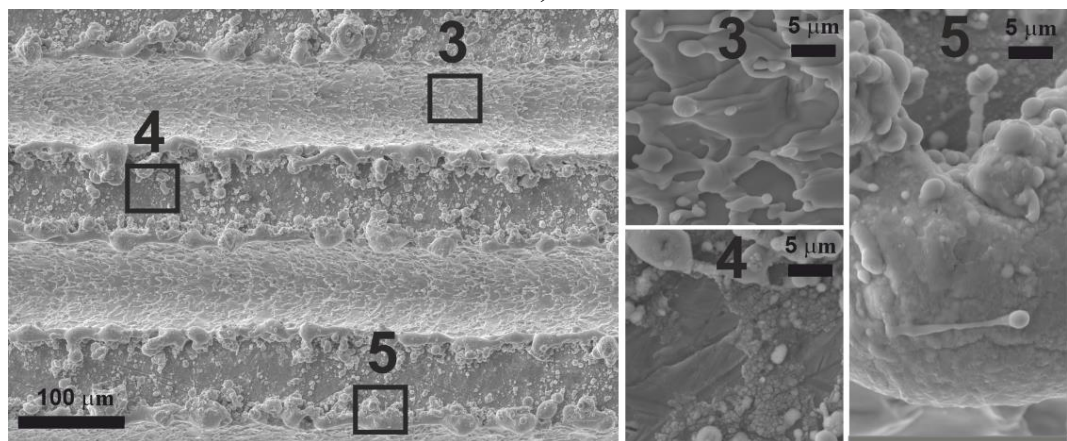
### **3.1.2 Результаты и обсуждение**

#### **3.1.2.1 Анализ микротекстуры и элементного состава модифицированных лазерным излучением поверхностей стали**

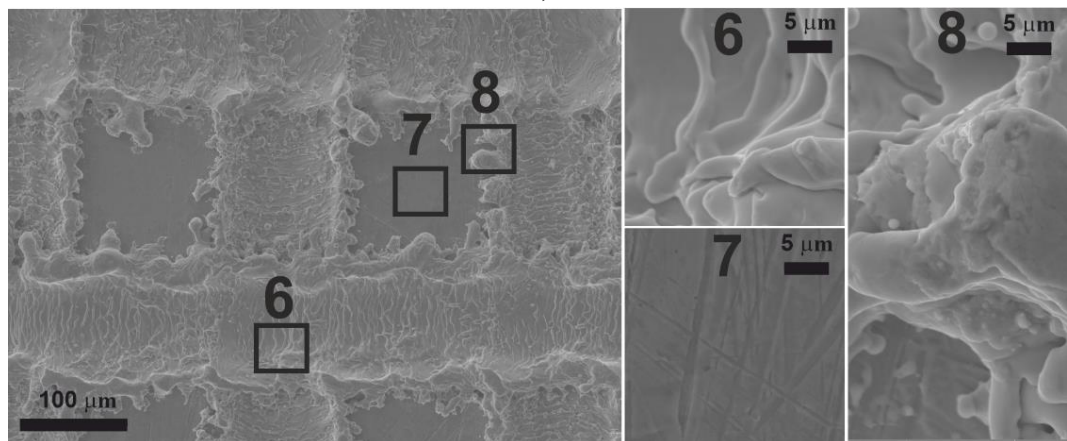
На рисунке 3.4 приведены СЭМ-изображения модифицированных поверхностей стали. Текстура «Микроканалы № 1» (рисунок 3.4а) состоит из однонаправленных микроканалов шириной 100 мкм. Расстояние между осями микроканалов составляет 110 мкм. Соседние микроканалы имеют общую границу, образующую выступ (боковое ребро микроканала). Микротекстура нижней поверхности микроканала и бокового ребра сформирована закристаллизовавшимся расплавом в виде струй и капель в форме сферы размером до 5 мкм. Микротекстура ребра содержит большее число элементов в форме сферы по сравнению с нижней поверхностью микроканала. Элементы в форме сферы образованы в результате плавления и абляции с последующей конденсацией паров металла и кристаллизацией расплава.



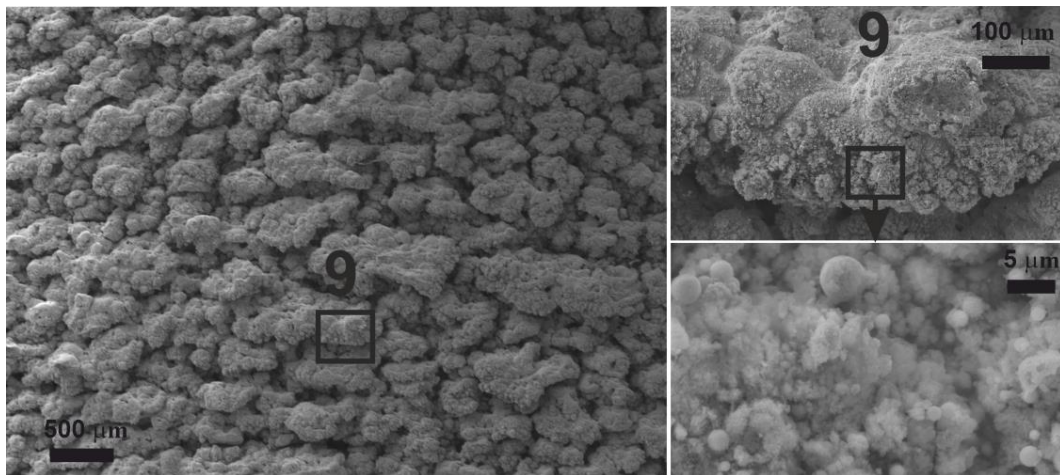
a)



b)



B)



г)

Рисунок 3.4 – СЭМ-изображения микротекстуры поверхностей стали, модифицированных лазерным излучением: а) «Микроканалы № 1»; б) «Микроканалы № 2»; в) «Микростолбики»; г) «Анизотропная»

Текстура «Микроканалы № 2» (рисунок 3.4б) также как текстура «Микроканалы № 1» состоит из однонаправленных микроканалов шириной около 90 мкм. Расстояние между осями микроканалов составляет 180 мкм. На данном виде текстуры между микроканалами расположена нетекстурированная, шлифованная абразивными материалами область поверхности шириной 90 мкм. Данный вид текстуры сформирован в условиях четырехкратного повторного прохождения луча. По этой причине тепловое воздействие в области формирования микроканала значительно выше аналогичной характеристики при формировании микротекстуры «Микроканалы № 1» и «Микростолбики». Вследствие более высокого теплового воздействия, а, следовательно, и более интенсивных процессов плавления и абляции материала, на боковых ребрах «Микроканалы № 2», образующих боковые стенки микроканала, сформировалась более шероховатая микротекстура. По этой же причине нижняя поверхность микроканала содержит меньшее число элементов в форме сфер, а на нетекстурированной области зарегистрированы хаотично расположенные продукты конденсации паров металла.

Текстура «Микростолбики» состоит из микроканалов шириной 90 мкм. Межосевое расстояние параллельно расположенных микроканалов составляет 180 мкм. На поверхности «Микростолбики» сформировалась микротекстура,

содержащая локальные, нетекстурированные лазерным излучением области размером  $90 \times 90$  мкм. Из рисунка 3.4в видно, что микротекстура нижней поверхности микроканалов, сформирована наслоившимся расплавом. Нетекстурированная часть поверхности не содержит элементы, образованные продуктами конденсации паров материала.

Микротекстура «Анизотропная» (рисунок 3.4г) многоуровневая, развитая. Сформирована преимущественно микро- и наночастицами, образующимся в результате процессов плавления и абляции материала.

Анализ СЭМ-изображений (рисунок 3.4) показывает, что из сформированных микротекстур «Анизотропная» является наиболее сложной многоуровневой и развитой. Данный вид текстуры сформирован кристаллизацией расплава и конденсацией паров металла, а текстуры «Микроканалы № 1», «Микроканалы № 2» и «Микростолбики» сформированы преимущественно кристаллизацией расплава материала. При формировании микроканалов «Микроканалы № 2» повторное четырехкратное прохождение луча обеспечило осаждение паров металла на нетекстурированной части поверхности. При однократном прохождении луча по поверхности при формировании текстуры «Микростолбики» на нетекстурированной части поверхности вблизи микроканалов не формируются продукты конденсации или кристаллизации металла. В условиях формирования лазерной модификацией текстур в виде микроканалов условно можно выделить элементы текстуры (локальные области): поверхность микроканала, боковое ребро, образующее боковую стенку микроканала и нетекстурированная часть вблизи микроканала.

В таблице 3.3 приведены усредненные по пяти измерениям результаты анализа элементного состава локальных областей, расположенных на модифицированных поверхностях (рисунок 3.2). Также в таблице 3.3 приведен стандартный элементный состав стали 20Х23Н18 и данные референтной поверхности стали 20Х23Н18 (поверхность, обработанная абразивными материалами).

Элементный состав локальных областей поверхностей стали 20Х23Н18, модифицированных лазерным излучением, зависит от интенсивности процессов химического реагирования, реализующихся в условиях абляции материала. Как показал анализ (таблица 3.3), элементный состав локальных областей #1-9 поверхностей стали с разной текстурой существенно отличается.

Таблица 3.3 – Весовой состав элементов на локальных областях поверхностей стали до проведения экспериментов по формированию шлака

| Порядковый номер локальной области на рисунке 3.4 | С         | О              | Мn        | Ni          | Cr          | Fe         |
|---------------------------------------------------|-----------|----------------|-----------|-------------|-------------|------------|
| Референтная поверхность                           |           |                |           |             |             |            |
| Измерение                                         | 0,5       | 0,2            | 1,7       | 18,2        | 22,6        | 56,8       |
| ГОСТ 5632-2014                                    | Менее 0,2 | Не нормируется | Менее 2,0 | 17,0 – 20,0 | 22,0 – 25,0 | Более 52,8 |
| Микроканалы № 1                                   |           |                |           |             |             |            |
| 1 (нижняя поверхность микроканала)                | 4,2       | 3,3            | 2,0       | 12,3        | 24,4        | 53,6       |
| 2 (ребро)                                         | 2,5       | 5,1            | 2,4       | 10,4        | 24,9        | 50,3       |
| Микроканалы № 2                                   |           |                |           |             |             |            |
| 3 (нижняя поверхность микроканала)                | 6,0       | 5,4            | 3,7       | 6,2         | 35,6        | 43,0       |
| 4 (ребро)                                         | 3,5       | 8,5            | 2,6       | 13,5        | 23,2        | 48,7       |
| 5 (немодифицированная область)                    | 0,6       | 3,8            | 2,0       | 10,0        | 27,6        | 51,5       |
| Микростолбики                                     |           |                |           |             |             |            |
| 6 (нижняя поверхность микроканала)                | 4,4       | 3,4            | 1,5       | 15,2        | 22,5        | 53,4       |
| 7 (немодифицированная область)                    | 0,8       | 0,8            | 1,3       | 17,0        | 22,8        | 55,6       |
| 8 (ребро)                                         | 2,7       | 5,5            | 2,5       | 15,1        | 22,1        | 52,1       |
| Анизотропная                                      |           |                |           |             |             |            |
| 9                                                 | 1,3       | 12,8           | 3,1       | 8,4         | 28,6        | 42,4       |

Из таблицы 3.3 хорошо видно, что лазерная модификация поверхностей стали приводит к существенному росту содержания кислорода и углерода.

Последнее достаточно хорошо известно [65], при лазерной модификации металлов увеличение кислорода обусловлено процессами химического реагирования, реализующимися при высокоэнергетическом тепловом воздействии в воздушной среде. Рост содержания углерода обусловлен неконтролируемым процессом адсорбции из окружающей среды неполярных молекул насыщенных углеводородов [95] под действием поляризации неактивных молекул углеводорода электрическим полем поверхности металла [96]. Необходимо отметить, что методом энергодисперсионной спектроскопии содержание С и О определяется с грубой погрешностью. Но полученные данные по содержанию С и О позволяют провести оценку на качественном уровне. Из таблицы 3.3 видно, что поверхность микроканала #3 и ребро #4 текстуры «Микроканалы № 2» характеризуются более высоким содержанием С и О по сравнению с аналогичными элементами #1, #6 и #2, #8 текстур «Микроканалы № 1» и «Микростолбики». Из исследуемых текстур, область #9 текстуры «Анизотропная» (таблица 3.3) характеризуется наиболее высоким содержанием О. Последнее подтверждает, что в условиях более высокого теплового воздействия в воздушной среде, генерируемого лазерным излучением, более интенсивно реализуются процессы пассивации поверхностей металлов.

Ниже приведены результаты анализа содержания Mn, Ni, Cr и Fe по локальным областям (поверхность микроканала, ребро, нетекстурированная часть (при наличии)) текстур в виде микроканалов.

В локальных областях #1 и #6 (таблица 3.3) нижней поверхности микроканалов текстур «Микроканалы № 1» и «Микростолбики» содержание Mn, Cr и Fe находится в пределах нормированных значений (см. референтная поверхность в таблице 3.3). В аналогичной области #3 микроканала текстуры «Микроканалы № 2» содержание Mn увеличилось на 1,7 % масс., Cr на 10,6 % по масс., а содержания Fe уменьшилось на 9,8 % масс. от нормированных значений. Известно [97], что чем выше в элементном составе жаропрочной жаростойкой стали содержания Mn, тем выше твердость и прочность стали. Также с увеличением содержания Mn повышается прокаливаемость, но снижается стойкость к ударным нагрузкам (к хрупкому разрушению) [98]. Рост Cr в составе

стали приводит к повышению магнитных сил и прочности при сохранении пластичности, но снижает ударную вязкость и теплопроводность стали [99]. Содержание Ni на поверхности микроканалов #1, #3 и #6 уменьшилось относительно нормированных значений. Из таблицы 3.3 видно, что снижение содержания Ni в локальной области #3 текстуры «Микроканалы № 2», значительнее, чем в локальных областях #1 и #6. Т.е. чем выше интенсивность лазерного излучения, тем более интенсивнее снижается содержание Ni. Уменьшение содержания никеля ведет к снижению коррозионной стойкости и жаропрочности, а также прочности и упругости [100].

Необходимо отметить, что зарегистрированное разнонаправленное изменение массового содержания Mn, Cr (увеличения) и Fe, Ni (уменьшения) в приповерхностном слое стали 20Х23Н18 при модификации лазерным излучением нельзя объяснить только различием в температурах плавления химических элементов Ni, Mn, Cr и Fe. Так, температура плавления марганца (1246 °С), никеля (1453 °С) значительно ниже аналогичных характеристик железа (1538 °С) и хрома (1907 °С). Последнее свидетельствует о комплексности изменения элементного состава стали при лазерной обработке. Эти изменения нельзя объяснить только температурами плавления и порогом абляции Ni, Mn, Cr и Fe, содержащихся в стали. При лазерном воздействии на поверхность металлов, процессы абляции сопровождаются и процессом конденсации испарившихся паров металлов. Сформулирована гипотеза, что зарегистрированное разнонаправленное изменение массового содержания Mn, Cr (увеличения) и Fe, Ni (уменьшения) обусловлено не только температурами плавления и абляции, но и процессами конденсации паров этих элементов.

Как было отмечено выше, микротекстура ребра микроканала отличается от микротекстуры нижней поверхности микроканала. Отличие состоит в том, что ребро микроканала содержит больше продуктов конденсации паров металла по сравнению с нижней поверхностью микроканала. По этим причинам элементный состав ребра микроканала отличается от элементного состава поверхности микроканала. По результатам анализа локальных областей #2, #4, #8 (таблица 3.3),

образующих ребра микроканалов установлено, что содержание в них Cr соответствует нормированным значениям стали 20X23H18. Содержание Ni и Fe уменьшилось, а Mn увеличилось относительно нормированных значений. На основании вышеизложенного сделан вывод о том, что изменение элементного состава ребра повлияло на повышение твердости, прочности и прокаливаемости ребра микроканала, но также повлияло на снижение стойкости к ударным нагрузкам (к хрупкому разрушению), коррозии, жаропрочности, упругости.

Два вида текстур «Микроканалы № 2» и «Микростолбики» содержат локальные немодифицированные области вблизи микроканалов. Как было отмечено ранее, по результатам анализа методом микроскопии на текстуре «Микростолбики» в локальной области немодифицированной части поверхности не выявлено продуктов конденсации паров металла. По этим причинам содержание элементов Mn, Ni, Cr и Fe в локальной области #7 (таблица 3.3) соответствует нормированным значениям этих элементов стали 20X23H18. На подобной локальной области #5 (таблица 3.3) текстуры «Микроканалы № 2» установлен рост содержания Cr и снижение содержания Ni и Fe. Содержание Mn в области #5 соответствует нормированным значениям. Результаты подтверждают, что в условиях конденсации паров металлов и осаждения капель расплава металла вблизи текстурированной области изменяется элементный состав нетекстурированной части стали 20X23H18. Последнее влияет на свойства такой локальной области поверхности: повышаются магнитные силы и прочность при сохранении пластичности, но снижается ударная вязкость и теплопроводность, жаропрочность и упругость.

По результатам анализа элементного состава области #9 (таблица 3.3) текстуры «Анизотропная» установлено, что на данном виде текстуры в результате модификации лазерным излучением произошли аналогичные изменения элементного состава, как и в области нижней поверхности микроканала #3 текстуры «Микроканалы № 2» (таблица 3.3). Аналогичные изменения (рост содержания Cr и Mn, а также снижения содержания Ni и Fe) элементного состава обусловлены тем, что текстуры «Анизотропная», как и микроканалы текстуры

«Микроканалы № 2», сформированы в результате значительного теплового воздействия достаточного для реализации интенсивных процессов плавления и абляции материала. В связи с изменением элементного состава текстуры «Анизотропная» произошли и изменения свойств приповерхностного слоя. В частности, повысилась твердость, прочность и прокаливаемость, но снизились стойкость к хрупкому разрушению, ударная вязкость и теплопроводность, упругость и жаропрочность.

Таким образом, при формировании текстуры в виде микроканалов лазерным излучением на поверхностях стали марки 20Х23Н18 по-разному изменяются свойства отдельных частей микроканалов (нижняя поверхность микроканала, ребра, нетекстурированные области). Сделать однозначные выводы по изменению свойств материала поверхности микроканала невозможно вследствие разнонаправленного изменения массового содержания Mn, Cr (увеличения) и Fe, Ni (уменьшения) в результате интенсивного лазерного воздействия. Уменьшение Ni и Fe и увеличение Mn повлияло на повышение твердости, прочности и прокаливаемости ребра микроканала, но также повлияло на снижение стойкости к ударным нагрузкам (к хрупкому разрушению), коррозии, жаропрочности, упругости. Рост содержания Cr и снижение содержания Ni и Fe на нетекстурированной части поверхности привело к повышению магнитных сил и прочности при сохранении пластичности, но снижению ударной вязкости и теплопроводности, жаропрочности и упругости.

### **3.1.2.2 Процессы, протекающие при нагреве золы, расположенной на поверхности стали**

В данном разделе представлены описание и анализ процессов, регистрируемых при нагреве модельного состава золы, расположенного на поверхностях стали (модифицированных лазерным излучением или обработанных абразивными материалами).

По результатам экспериментов условно выделены следующие процессы: прогрев; затвердевание золы; формирование парогазовой смеси; зажигание и выгорание паров масла; плавление золы (шлакование). Этим процессам соответствуют характерные времена, а также температуры поверхности (см. таблицу 3.2).

На рисунке 3.5 приведены диаграммы, иллюстрирующие динамику трансформаций золы в соответствии с регистрируемыми процессами.

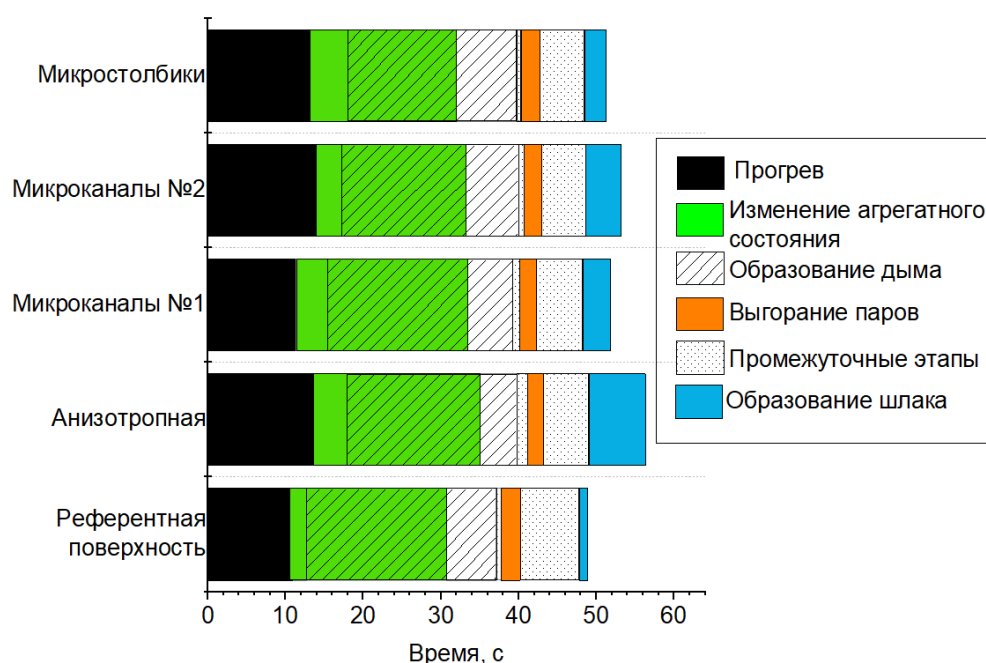


Рисунок 3.5 – Времена реализации процессов, протекающих при нагреве зольной смеси на поверхностях стали

Из рисунка 3.5 видно, что после начала нагрева (не менее 10 с для всех типов поверхностей стали) начиналась видимая трансформация образца модельной золы. В условно выделенной стадии «затвердевание зольной смеси» образец золы после интенсивного испарения масла переходит в твердое состояние. Последнее сопровождается образованием корки на поверхности золы и изменением бурого цвета на серый, что достаточно хорошо видно по видеокадрам (рисунок 3.3). Начало изменения агрегатного состояния происходит на поверхности раздела «сталь – зола» с дальнейшим распространением по всему объему образца золы.

Такое направление перехода агрегатного состояния обусловлено тем, что подвод теплоты осуществляется преимущественно кондуктивным способом от поверхности стали. Переход верхней точки образца золы в твердое состояние принят за момент завершения процесса «затвердевание золы»

Стадия «формирование парогазовой смеси» реализуется до завершения затвердевания золы. Горючий компонент (масло) нагревается до температуры испарения. В окрестности образца золы формируется смесь продуктов испарения масла и воздуха (идентифицируется как «дым», рисунок 3.3). При выполнении условий зажигания (по концентрации горючих веществ и температуре) происходило зажигание паров и их выгорание.

Стадия «формирование шлака» начинается после завершения процесса горения. Начало формирования шлака характеризуется уменьшением высоты затвердевшего образца золы. Инициация формирования шлака происходит на поверхности раздела «сталь – зола». В процессе плавления золы высота отвердевшего образца постепенно уменьшается до полного его перехода в жидкое агрегатное состояние.

Из рисунка 3.5 видно, что в экспериментах по шлакованию с референтной поверхностью задержки и длительности выделенных процессов меньше, чем в аналогичных экспериментах с модифицированными лазерным излучением поверхностями. Последнее можно объяснить шероховатостью текстуры, сформированной лазерным излучением и агрегатным состоянием золы. Известно [48], что в условиях кондуктивного высокотемпературного нагрева горючих веществ (жидких и гелеобразных топлив), расположенных на поверхностях металлов, времена задержки зажигания и выгорания капель или фрагментов топлив можно контролировать путем изменения шероховатости (текстуры) поверхности нагрева. В случае жидких топлив время задержки зажигания и выгорания тем меньше, чем больше шероховатость поверхности нагрева, на которой расположена капля топлива [90]. В случае, когда топливо находится в гелеобразном состоянии, время задержки зажигания тем меньше, чем меньше шероховатость поверхности [48]. Т.е. шероховатость поверхностей нагрева и свойства горючих веществ

являются одними из доминирующих факторов, влияющих на характеристики зажигания в условиях высокотемпературного нагрева преимущественно кондуктивным способом подвода теплоты. Зарегистрированные большие времена инициации физико-химических процессов и их большие продолжительности на поверхностях, модифицированных лазерным излучением (рисунок 3.5), можно объяснить тем, что в условиях высокотемпературного нагрева золы, расположенной на сильно шероховатой поверхности (модифицированной лазерным излучением), площадь контакта с поверхностью меньше, чем площадь контакта в случае нахождения золы на поверхности, обработанной абразивными материалами. Площадь контакта меньше по причине того, что образец расположен на сильно шероховатой поверхности на вершинах выступов. При этом в полостях шероховатости под горючим материалом находится воздух, который характеризуется высоким термическим сопротивлением. Последнее значительно влияет на передачу теплоты (значительно снижает её) кондуктивным способом подвода от поверхности нагрева к фрагменту зольно-масляной смеси. С уменьшением количества подведенной теплоты, при прочих идентичных условиях, требуется больше времени для достижения температуры источника нагрева (поверхности стали), при которой происходит инициация зарегистрированных физико-химических процессов.

При идентичных условиях нагрева из сформированных лазерным излучением текстур наибольшее время задержки до формирования расплава шлака зарегистрировано на текстуре «Анизотропная» (рисунок 3.5). Последнее можно объяснить тем, что данный вид текстуры в сравнении с текстурами «Микроканалы № 1», «Микроканалы № 2» и «Микростолбики» характеризуется развитой многомодальной текстурой, состоящей из взаимосвязанных микро- и наноразмерных полостей. Вероятно, модифицированный слой текстуры «Анизотропная» характеризуется более высокими значениями термического сопротивления в сравнении с аналогичной характеристикой текстур «Микроканалы № 1», «Микроканалы № 2» и «Микростолбики» несмотря на то, что последние имеют относительно большие полости (микроканалы).

На рисунке 3.6 приведены значения температур поверхностей стали (источника нагрева), соответствующие выделенным стадиям превращения зольного состава при высокотемпературном нагреве от поверхности стали.

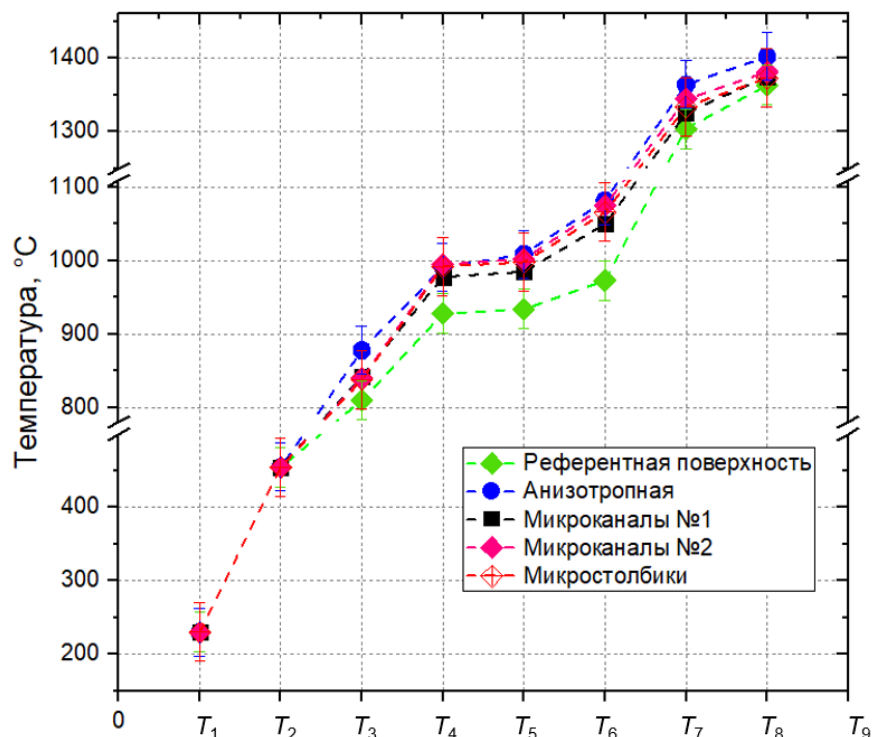


Рисунок 3.6 — Значения температур поверхностей стали, соответствующие характерным процессам (номера по оси абсцисс) трансформации зольной смеси

Из восьми характерных температур поверхностей стали (источника нагрева), приведенных на рисунке 3.6, особо важной с практической точки зрения является температура, соответствующая зажиганию паров масла (поз. 5, рисунок 3.6). Установлено, что при использовании референтной поверхности минимальная ее температура, обеспечивающая зажигание паров масла (T<sub>5</sub>, рисунок 3.6) меньше (на 60–75 °C), чем аналогичная характеристика при использовании модифицированных поверхностей. При прочих идентичных условиях рост значений T<sub>5</sub> поверхностей, модифицированных лазерным излучением, может быть обусловлен только более развитой шероховатостью. Известно [48], что в условиях кондуктивного нагрева капель жидких топлив (в том числе турбинного масла) характеристики текстуры (шероховатости) не влияют на значения T<sub>5</sub>. Но если

горючее вещество находится в гелеобразном состоянии, то  $T_5$  будет иметь большие значения на поверхностях с большей шероховатостью. Последнее обусловлено тем, что под частицей гелеобразного топлива, расположенной на сильной шероховатой поверхности нагрева в полостях, обусловленных шероховатостью, находится воздух. Последний за счет высокого термического сопротивления значительно снижает кондуктивный подвод теплоты от поверхности нагрева к частице топлива. Последнее является причиной роста  $T_5$  для гелеобразных топлив, расположенных на сильно шероховатых поверхностях нагрева [48]. В проведенных исследованиях рост значений  $T_5$  для образца зольно-масляной смеси (рисунок 3.6, позиция 5) также можно объяснить ростом термического сопротивления поверхностей, характеризующихся большей шероховатостью. Также из рисунка 3.6 видно, что инициация физико-химических процессов «изменение агрегатного состояния», «дымление», «горение», «формирование шлака» на поверхностях стали, модифицированных лазерным излучением, происходила при более высоких температурах, чем на поверхностях, обработанных абразивными материалами. Последнее хорошо соответствует выводам, установленным при анализе зависимостей рисунок 3.5. Причинами повышения температур поверхностей, обеспечивающих реализацию физико-химических процессов (рисунок 3.6), являются значительная шероховатость, способствующая росту термического сопротивления слоя поверхности, модифицированного лазерным излучением, а также агрегатное состояние нагреваемого вещества. Установлено (рисунок 3.6), что за счет формирования текстуры «Анизотропная» на поверхностях стали можно сместить температуру нагрева поверхностей стали (источника нагрева) в область более высоких температур на 60 °С, при которых инициируется формирование слоя шлака. Текстуры «Микроканалы № 1», «Микроканалы № 2» и «Микростолбики» также продемонстрировали более высокие значения температур инициации формирования слоя шлака по сравнению референтной поверхностью. Можно сделать вывод о том, что лазерный способ обработки поверхностей стали марки 20Х23Н18 наносекундной длительности импульса с характеристиками, достаточными для формирования на поверхности текстуры «Анизотропная»,

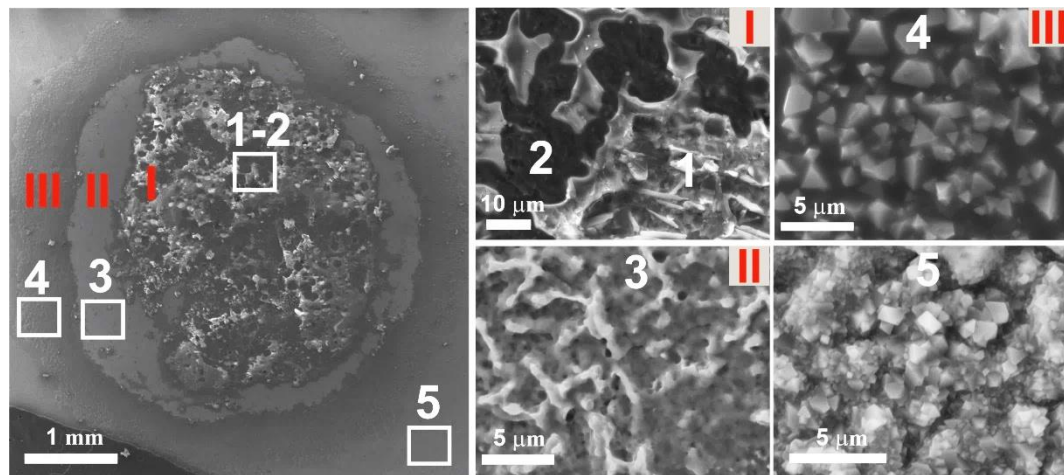
является перспективным подходом снижения интенсивности шлакования пароперегревателей и других поверхностей нагрева котла, на которых формируется золошлаковый слой. Суть подхода заключается в формировании лазерным излучением текстуры на поверхностях стали, способствующей снижению передачи теплоты кондуктивным способом к золошлаковому слою, и тем самым способствующей формированию условий смещения температур нагрева поверхностей стали (источников нагрева золошлакового слоя) в область больших температур (выше на 60 °С), при которых протекают процессы формирования расплава шлака.

### **3.1.2.3 Анализ микротекстуры и элементного состава поверхностей стали после их шлакования**

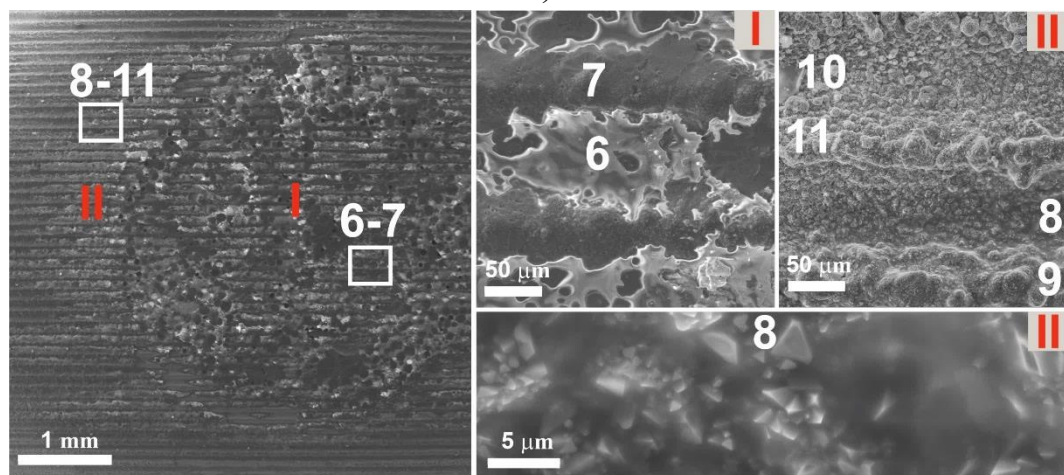
На рисунке 3.7 приведены СЭМ-изображения, а в таблице 3.4 – результаты анализа весового состава химических элементов поверхностей стали после проведения экспериментов по шлакованию. На рисунке 3.7 арабскими цифрами обозначены области, в которых проводились исследования по определению химического состава приповерхностного слоя.

По результатам анализа СЭМ-изображений остатка закристаллизовавшегося минерального шлакообразующего вещества на поверхности стали, обработанной абразивными материалами (рисунок 3.7а), условно выделены три фронта растекания расплава шлака (на рисунке 3.7 фронт растекания обозначен римскими цифрами). Из рисунка 3.7а видно, что в результате плавления сферического образца золы диаметром 2,5 мм в условно выделенном фронте I сформировался слой шлака размером до 2,8 – 3,2 мм. По СЭМ-изображениям (рисунок 3.7а, #1 – 2) хорошо видно, что данный слой неоднородный, состоит из локальных областей, содержащих элементы модельного состава золы с преобладанием либо Са (таблица 3.4, #1), либо Al (таблица 3.4, #2). В данных областях также зарегистрировано высокое содержание кислорода. В области растекания первого фронта не обнаружено содержание основных химических элементов стали, кроме

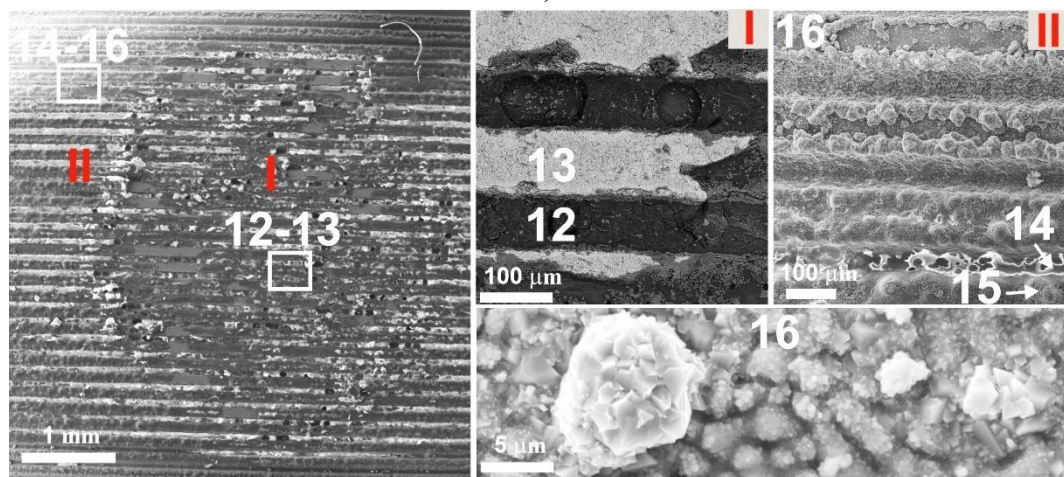
железа. Последний также входит в компонентный состав используемого модельного состава золы. Необходимо отметить, что текстура локальных областей с преобладанием содержания Al отличается от текстуры областей с преобладанием Ca.



a)



б)



в)

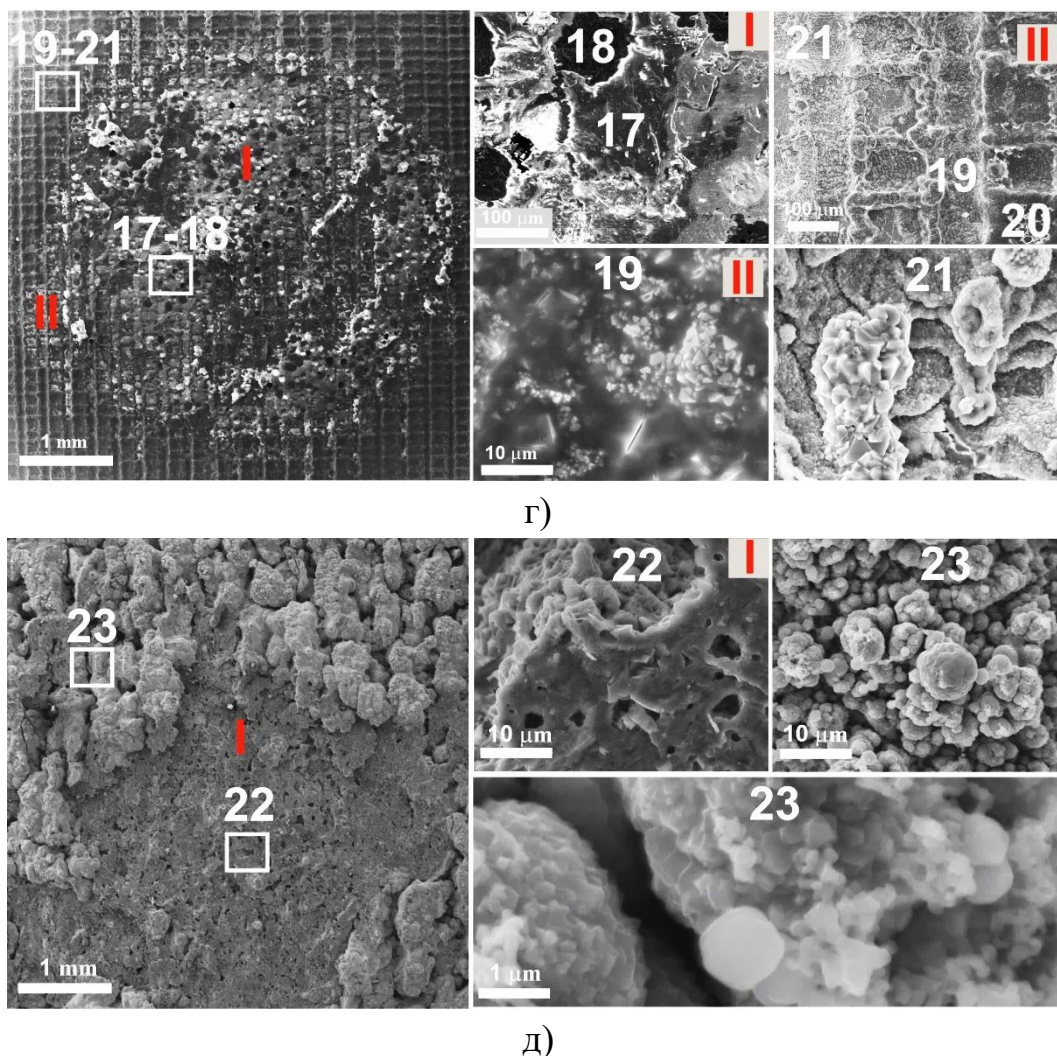


Рисунок 3.7 – СЭМ-изображения микротекстуры поверхностей стали после проведения экспериментов по шлакованию: а) Референтная поверхность; б) «Микроканалы № 1»; в) «Микроканалы № 2»; г) «Микростолбики»; д) «Анизотропная». Римскими цифрами обозначены фронты растекания шлака. Арабскими цифрами выделены области, в которых проводился анализ химического состава. Результаты последнего сведены в таблицу 3.4

Текстура поверхности условно выделенного фронта II (рисунок 3.7а, #3) состоит из элементов в виде струй. Границы окружности второго фронта (рисунок 3.7а) характеризуются размером от 2,8 мм до 3,8 мм. Установлено, что второй фронт не содержит Са, а содержание элементов Al и Si (таблица 3.4, #3), входящих в состав золы, по значениям близки к погрешности 0,1 % регистрации химических элементов. Элементный состав поверхности в области второго фронта состоит преимущественно из Fe и Ni. Необходимо отметить, что содержание Fe и

Ni увеличилось, а содержание Cr и Mn уменьшилось по сравнению с содержанием аналогичных элементов на референтной поверхности (таблица 3.3).

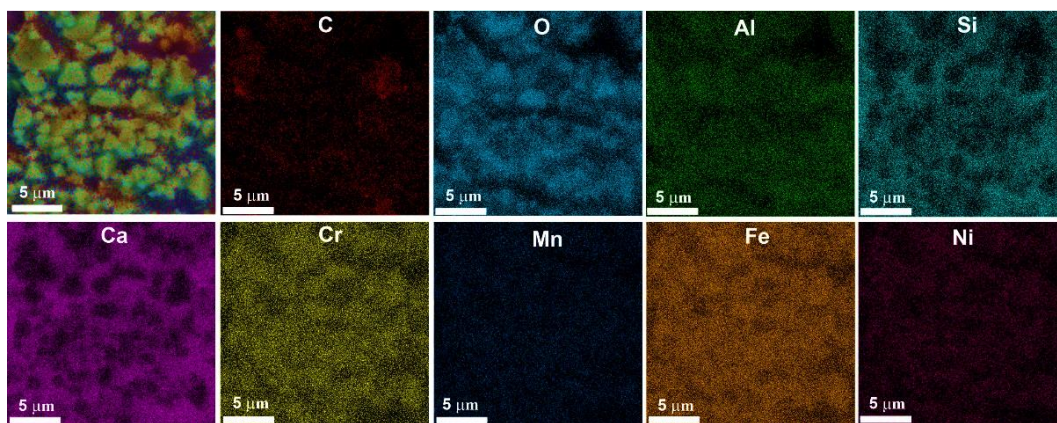
Таблица 3.4 – Весовой состав элементов на локальных областях поверхностей стали после проведения экспериментов по шлакованию

| Порядковый номер локальной области на рисунке 3.7                      | C   | O    | Mn  | Ni   | Cr   | Fe   | Al   | Si   | Ca   |
|------------------------------------------------------------------------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| Референтная поверхность                                                |     |      |     |      |      |      |      |      |      |
| 1 (фронт I)                                                            | 2,8 | 39,5 | -   | -    | 0,5  | 14,9 | 4,5  | 12,4 | 25,4 |
| 2 (фронт I)                                                            | 4,8 | 39,4 | -   | -    | 0,2  | 16,0 | 27,1 | 2,3  | 10,2 |
| 3 (фронт II)                                                           | 2,5 | 1,6  | 1,0 | 24,7 | 10,6 | 59,1 | 0,3  | 0,2  | -    |
| 4 (фронт III)                                                          | 2,7 | 28,0 | 1,6 | 3,9  | 11,2 | 35,5 | 1,6  | 4,4  | 11,1 |
| 5 (область, не содержащая расплав минеральных шлакообразующих веществ) | 1,1 | 21,0 | 5,6 | 3,3  | 47,2 | 21,7 | -    | -    | -    |
| Микроканалы № 1                                                        |     |      |     |      |      |      |      |      |      |
| 6 (фронт I)                                                            | 3,0 | 43,6 | 0,2 | 0,1  | 0,6  | 13,1 | 5,5  | 11,7 | 22,2 |
| 7 (фронт I)                                                            | 2,3 | 34,2 | 0,4 | 2,1  | 3,6  | 22,4 | 4,5  | 9,6  | 20,7 |
| 8 (нижняя поверхность микроканала со шлаком во фронте II)              | 2,9 | 25,1 | 1,3 | 1,6  | 4,3  | 37,2 | 1,0  | 7,6  | 19,0 |
| 9 (ребро шлаком во фронте II)                                          | 3,2 | 33,2 | 0,9 | 3,3  | 4,4  | 30,7 | 1,2  | 7,7  | 15,4 |
| 10 (нижняя поверхность микроканала без шлака)                          | 3,1 | 22,8 | 2,2 | 3,6  | 26,1 | 42,2 | -    | -    | -    |
| 11 (ребро без шлака)                                                   | 2,6 | 22,0 | 3,8 | 4,6  | 25,0 | 41,9 | -    | -    | -    |
| Микроканалы № 2                                                        |     |      |     |      |      |      |      |      |      |
| 12 (нижняя поверхность микроканала во фронте I)                        | 1,9 | 35,5 | 0,3 | 0,4  | 1,1  | 19,1 | 7,3  | 11,2 | 23,2 |
| 13 (не модифицированная лазерным излучением область во фронте I)       | 1,5 | 1,2  | 0,4 | 21,8 | 10,3 | 63,8 | 0,3  | 0,7  | -    |
| 14 (нижняя поверхность микроканала во фронте II)                       | 4,5 | 39,5 | 0,5 | -    | 1,8  | 21,4 | 3,7  | 8,7  | 19,9 |
| 15 (ребро и не модифицированная часть поверхности во фронте II)        | 2,2 | 31,5 | 0,7 | 2,4  | 4,2  | 25,9 | 3,0  | 8,8  | 21,3 |
| 16 (область, не содержащая шлак во фронте II)                          | 1,0 | 21,2 | 5,9 | 2,9  | 45,1 | 23,9 | -    | -    | -    |

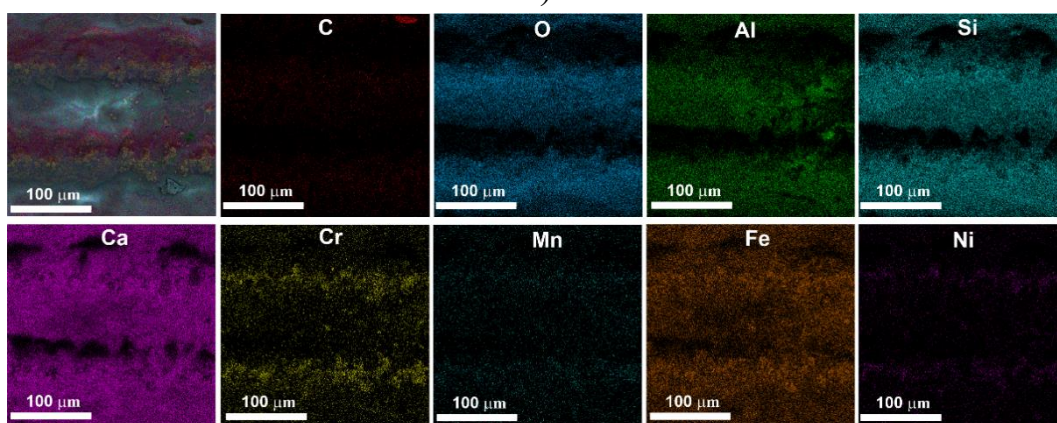
Продолжение таблицы 3.4

| Микростолбики                                    |      |      |     |      |      |       |      |      |      |
|--------------------------------------------------|------|------|-----|------|------|-------|------|------|------|
| 17 (нижняя поверхность микроканала во фронте I)  | 2,3  | 42,1 | -   | -    | 0,2  | 15,9  | 6,0  | 11,1 | 22,4 |
| 18 (не модифицированная область во фронте I)     | 3,3  | 38,4 | -   | -    | 0,1  | 19,2  | 25,1 | 2,8  | 11,1 |
| 19 (нижняя поверхность микроканала во фронте II) | 3,9  | 37,2 | 0,3 | -    | 1,6  | 22,6  | 3,5  | 8,8  | 22,1 |
| 20 (не модифицированная область во фронте II)    | 2,6  | 34,1 | 0,6 | 2,5  | 4,3  | 28,9  | 1,9  | 6,8  | 18,3 |
| 21 (поверхность, не содержащая шлак)             | 1,1  | 20,1 | 4,0 | 2,1  | 47,2 | 25,5  | -    | -    | -    |
| Анизотропная                                     |      |      |     |      |      |       |      |      |      |
| 22 (фронт I)                                     | 1,5  | 31,6 | 0,7 | 6,0  | 19,5 | 34,1  | 1,1  | 1,7  | 5,3  |
| 23 (область без шлака)                           | 1,49 | 23,0 | 2,0 | 10,8 | 20,6 | 42,11 | -    | -    | -    |

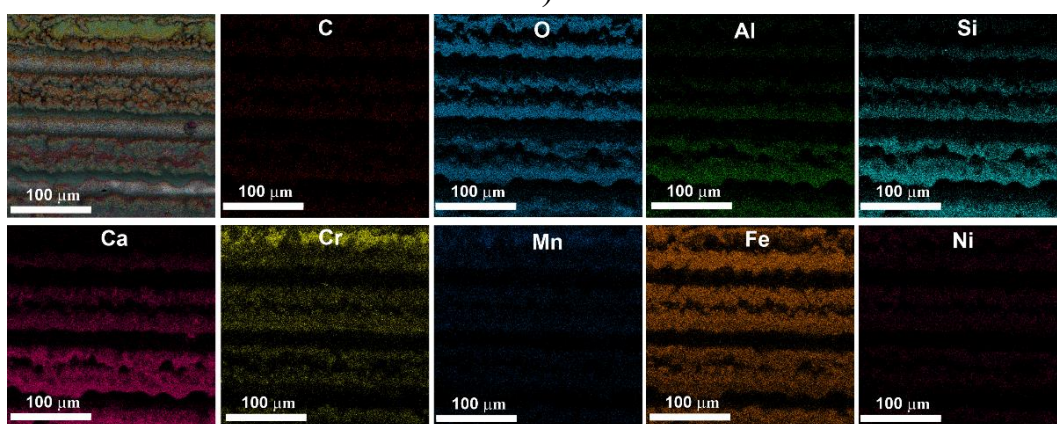
Установлено (рисунок 3.7а, #4), что текстура поверхности в области условно выделенного фронта III состоит из зерен размером до 2,5 мкм. Границы окружности фронта III характеризуются размером от 3,8 до 5,0 мм. По результатам анализа элементного состава (таблица 3.4, #4) установлено, что поверхность в области третьего фронта, содержит как химические элементы используемого зольного состава (Al, Si, Ca), так и все химические элементы стали 20Х23Н18. Из элементов состава, имитирующего золу, преобладает Ca. По сравнению с составом поверхности, обработанной абразивными материалами (таблица 3.3) в области третьего фронта уменьшилось содержание Ni, Cr и Fe, но значительно выросло содержание кислорода. По результатам картирования (рисунок 3.8а) установлено, что расплав шлака находится между зернами (преобладает содержание Ca, Si и Al). Зерна состоят преимущественно из Cr, Fe и Ni, также в них высокое содержание кислорода (рисунок 3.8а).



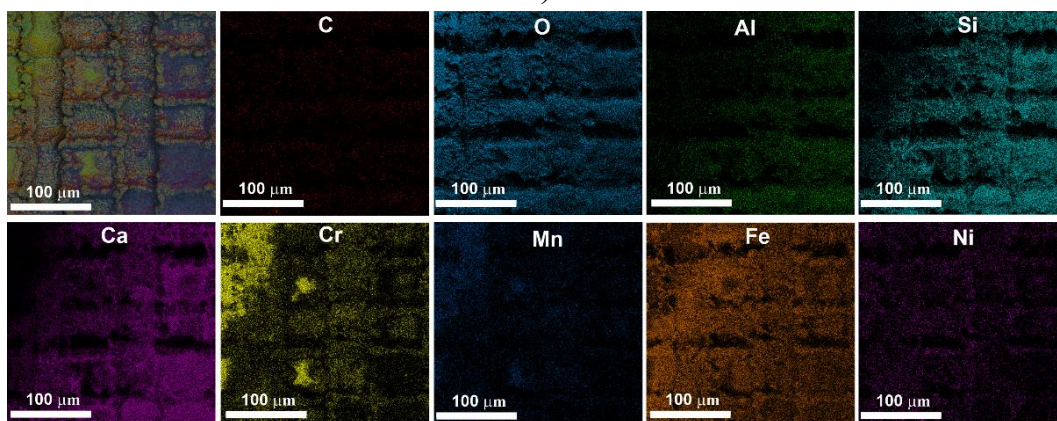
a)



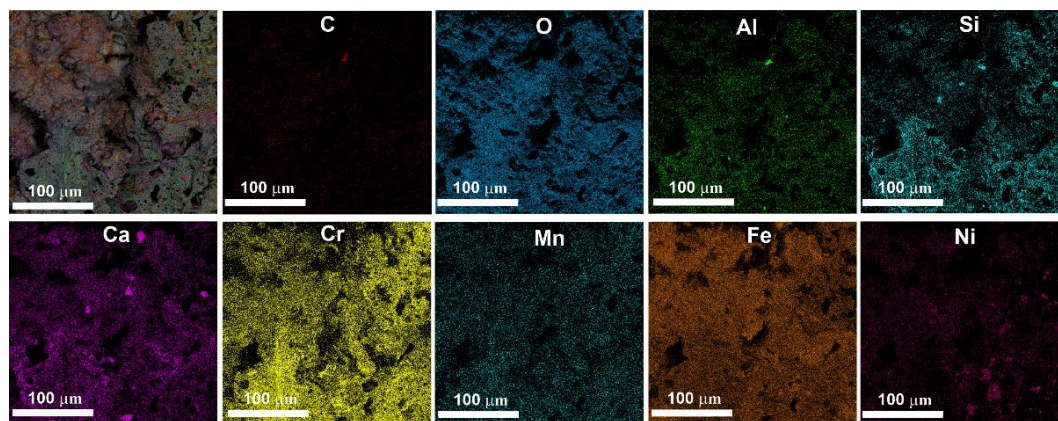
b)



B)



r)



д)

Рисунок 3.8 – Изображения картирования поверхностей стали после проведения экспериментов по шлакованию: а) Референтная поверхность; б) «Микроканалы № 1»; в) «Микроканалы № 2»; г) «Микростолбики»; д) «Анизотропная»

По результатам анализа СЭМ-изображений (рисунок 3.7а, #5) референтной поверхности стали в области, не содержащей остатков расплава минеральных шлакообразующих веществ установлено, что после кратковременной выдержки (не более 10 с) стали 20Х23Н18 при температуре  $\approx 1400^\circ\text{C}$  на её поверхности сформировалась текстура из зерен размером до 2,5 мкм. Весовой состав химических элементов (таблица 3.4, #5) в приповерхностном слое значительно изменился. Содержание хрома возросло более чем на 20 % до  $\approx 47\%$ . Содержание марганца выросло более чем в два раза до значений порядка 5–6 %. Также значительно выросло содержание кислорода. При этом произошло снижение содержания железа и никеля более чем в два раза до значений  $\approx 21\text{--}22\%$  и  $\approx 3\%$ , соответственно.

Установлено, что на текстурах, состоящих из микроканалов («Микроканалы № 1» (рисунок 3.7б), «Микроканалы № 2» (рисунок 3.7в) и микростолбиков («Микростолбики» (рисунок 3.7г), расплав шлака растекается вдоль микроканалов, принимает форму близкую к эллипсу аналогично капле воды при её растекании по подобного рода текстурам [67] в условиях, соответствующих окружающей среде (при температурах  $22\text{--}25^\circ\text{C}$ ). Площадь растекания капли по микроканалам и микростолбикам, в условиях, когда она принимает форму эллипса,

больше площади растекания капли по поверхности, обработанной абразивными материалами, когда капля принимает форму окружности при прочих равных условиях. При этом толщина слоя растекшейся жидкости по поверхности с микроканалами много меньше толщины слоя жидкости, растекшейся по поверхности, обработанной абразивными материалами. Шлак характеризуется высоким термическим сопротивлением, его формирование на поверхностях нагрева теплотехнического оборудования является причиной аварий, происходящих вследствие перегрева, термической деформации и разрушения поверхности нагрева [50]. Перегрев, термическая деформация и разрушение поверхности нагрева происходят при достижении критической толщины шлака. С одной стороны, увеличение площади растекания шлака по поверхностям с текстурой в виде микроканалов и микростолбиков негативно влияет на характеристики теплообмена. Но, с другой стороны, уменьшение толщины слоя шлака за счет увеличения площади его растекания является неоспоримым преимуществом по сравнению с использованием поверхностей нагрева, обработанных абразивными материалами. На СЭМ-изображениях поверхностей стали, модифицированных лазерным излучением (рисунок 3.7б – 2.7д) в отличие от референтной поверхности (рисунок 3.7а) невозможно явно выделить три фронта растекания расплава шлака. На поверхностях с текстурой «Микроканалы № 1», «Микроканалы № 2» и «Микростолбики» можно выделить два фронта растекания. Фронт I растекания (рисунок 3.7б – 3.7д) характеризуется разрушением текстуры и содержанием крупных агломератов закристаллизовавшегося расплава. Фронт II (рисунок 3.7б – 3.7д) не содержит явные признаки разрушения текстуры, характеризуется присутствием расплава шлака преимущественно в микроканалах.

По СЭМ-изображениям поверхности с текстурой «Микроканалы № 1» (рисунок 3.7б) установлено, что диаметр растекания шлака фронта I составляет не более 4,2 мм. В фронте I, как и на референтной поверхности, слой закристаллизовавшегося материала неоднороден. Но в отличие от референтной поверхности не выявлено участков, содержащих преимущественно алюминий. Во фронте I выделено два вида текстуры, сформированной закристаллизовавшимся

материалом. Один из них сформирован на нижней поверхности микроканала (рисунок 3.7б, #6), второй на ребре (рисунок 3.7б, #7). По результатам анализа химического состава (таблица 3.4, #6) и картирования (рисунок 3.8б) установлено, что на нижней поверхности микроканала сформировался расплав, в составе которого преобладает Ca, Fe и Si. Ребро микроканала (таблица 3.4, #7) также содержит преимущественно Ca, Fe и Si. Но в отличие от референтной поверхности в области первого фронта с текстурой «Микроканалы № 1» обнаружены в относительно малом весовом составе элементы (Cr, Mn и Ni), входящие в состав стали. На нижней поверхности микроканала содержание Cr, Mn и Ni менее 1 % (таблица 3.4, #6), а на ребре менее 4 % (таблица 3.4, #7). Можно сделать вывод о том, что на поверхности с текстурой «Микроканалы № 1» расплав шлака не сформировал слой достаточной толщины для полного покрытия всей поверхности. Причем на ребре весовой состав элементов, входящих в сталь, больше, чем на нижней поверхности микроканала. Из элементов, входящих в состав стали, преобладает Cr. Необходимо отметить, что элементный состав поверхности в первом фронте характеризуется высоким содержанием кислорода.

Анализ трансформации текстуры «Микроканалы № 1» и её химического состава проведен на участке поверхности #8 – 11 (рисунок 3.7б), содержащим фронт II и область, не покрытую слоем шлака. Из СЭМ-изображений (рисунок 3.7б, #8) видно, что текстура «Микроканалы № 1» во фронте II подобна текстуре референтной поверхности во фронте III (рисунок 3.7а, #4). То есть состоит из зерен размером до 2,5 мкм, расплав шлака находится между зернами. Зерна состоят преимущественно из хрома и железа. Границы растекания фронта II характеризуются размером от 4,2 мм до 6,6 мм. Нижняя поверхность микроканалов во фронте растекания II состоит преимущественно из железа и кальция (таблица 3.4, #8). Зарегистрированное наличие Cr, Mn, Ni в области #8 (таблица 3.4) обусловлено тем, что расплав шлака не покрыл отдельные зерна на поверхности. Аналогичная ситуация и с ребром микроканалов во фронте растекания II. Весовой элементный состав ребер (таблица 3.4, #9) во фронте II близок по значениям к составу нижней поверхности в данном фронте растекания. Но с меньшим

содержанием Ca и Fe, компонентов, входящих в состав расплава шлака, и более высоким содержанием Cr и Ni, компонентов, входящих в состав стали. Последнее свидетельствует о том, что на ребрах во фронте II также содержится шлак, но в меньшем содержании, чем на нижней поверхности микроканала. В области 10 (нижней поверхности микроканала без шлака) и 11 (ребро микроканала без шлака) таблица 3.4 не зарегистрированы элементы Al, Ca и Si, входящие в расплав шлака. По результатам сравнения с элементным составом подобных участков (таблица 3.3, текстура «Микроканалы № 1», области #1 и #2) до проведения экспериментов по шлакованию установлено, что выдержка поверхностей с текстурой «Микроканалы № 1» при температуре  $\approx 1400$  °C и длительности порядка 10 секунд привела не к таким кардинальным изменениям в весовом элементном составе как на поверхности, обработанной абразивными материалами. Из таблицы 3.4 областей #10 и #11 видно, что содержание никеля снизилось более чем в два раза, содержание железа уменьшилось не более чем на 12 %, а изменения в содержании Mn и Cr составило не более 2 %. Как и ожидалось, выдержка поверхностей стали при температуре  $\approx 1400$  °C привела к сильному окислению (содержание кислорода увеличилось до  $\approx 22$  %). Можно сделать вывод о том, что формирование текстуры «Микроканалы № 1» лазерным излучением наносекундной длительности позволило повысить сопротивление поверхностей стали к изменению элементного состава при выдержки их в условиях, соответствующих кратковременному (до 10 с) аварийному режиму работы энергогенерирующего оборудования при достижении температуры порядка  $\approx 1400$  °C, достаточной для формирования шлака из золы.

По СЭМ-изображениям поверхности с текстурой «Микроканалы № 2» (рисунок 3.7в) установлено, что размер фронта I растекания шлака составляет не более 4,0 мм. В первом фронте растекания шлака на текстуре «Микроканалы № 2» зарегистрировано разрушение ребер микроканалов (рисунок 3.7в, #13), микроканал заполнен шлаком (рисунок 3.7в, #12). Элементный анализ таких характерных областей во фронте I растекания шлака по текстуре «Микроканалы № 2» показал, что на нижней поверхности микроканалов (таблица 3.4, #12) находится расплав

шлака (доминирует содержание Ca, Si, Fe и Al). Как и в случае с текстурой «Микроканалы № 1», в микроканалах во фронте I зарегистрированы элементы, входящие в состав стали (Cr, Mn и Ni). Последнее можно объяснить тем, что толщина слоя шлака в микроканалах достаточно мала для регистрации методом ЭДС основных элементов, входящих в состав стали. Причем содержание этих элементов на текстуре «Микроканалы № 2» выше, чем на текстуре «Микроканалы № 1» в микроканалах фронта I. Последнее объясняется тем, что ширина микроканалов «Микроканалы № 2» больше аналогичной характеристики микроканалов «Микроканалы № 1». Вследствие этого толщина слоя шлака в микроканалах «Микроканалы № 2» ниже, чем в микроканалах «Микроканалы № 1» во фронте I. Следовательно, для уменьшения толщины слоя шлака необходимо формировать текстуру с большей шириной микроканалов.

Как отмечалось ранее, в области фронта I ребра микроканалов текстуры «Микроканалы № 2» разрушены (рисунок 3.7в, #13), изменилась текстура. Установлено (таблица 3.4, # 13), что к прилегающей части разрушенного ребра на не модифицированной лазерным излучением области содержится менее 1 % Al и Si. Содержания Ca не зарегистрировано, но значительно возросло (более чем на 10 %) содержание железа. Последнее входит и в состав стали. Из химических элементов, входящих в состав стали, помимо железа более, чем на 10 % возросло содержание никеля, а содержание Cr и Mn уменьшилось в сравнении с данным участком поверхности (таблица 3.3, #5) до проведения экспериментов по шлакованию. Основной особенностью данного участка является то, что в его составе очень низкое содержание кислорода (менее 2 %). Такая же особенность (низкое содержание кислорода (менее 2 %)) зарегистрирована на референтной поверхности в области второго фронта растекания с подобного рода текстурой (рисунок 3.7а) и элементным составом (таблица 3.4, #3).

На рисунке 3.7в приведены СЭМ-изображения участка поверхности с текстурой «Микроканалы № 2», содержащего второй фронт растекания и область, не покрытую слоем шлака (#14–16). На рисунке 3.8в приведены результаты картирования данного участка поверхности. Из рисунка 3.7в, #14 и рисунка 3.8в

видно, что закристаллизовавшийся расплав шлака преимущественно содержится в микроканалах. Ребра микроканалов рисунок 3.7в, #15 не разрушены. По результатам анализа элементного состава установлено (таблица 3.4, #14), что на нижней поверхности микроканала высокое содержание элементов Ca, Si и Al и низкое Cr и Mn. Подобное преобладание элементов, входящих в состав шлака, над содержанием элементов, входящих в состав стали, зарегистрировано в области ребра и немодифицированной части поверхности (таблица 3.4, #15), прилегающей к данному микроканалу. Отличие между микроканалом и прилегающей к нему части поверхности состоит в том, что содержание Cr и Mn в ребре и немодифицированной части выше содержания аналогичных элементов на нижней части поверхности микроканала. Последнее свидетельствует о том, что ребра микроканалов и прилегающая к ним немодифицированная часть поверхности стали покрыты более тонким слоем закристаллизовавшегося шлака, чем микроканал. Шлак растекается во втором фронте преимущественно по микроканалам.

По результатам анализа поверхности с текстурой, не покрытой шлаком, установлены изменения как в текстуре (рисунок 3.7в, #16), так и в элементном составе (таблица 3.4, # 16) аналогичные участку референтной поверхности стали в области, не содержащей остатков расплава состава, имитирующего золу (рисунок 3.7а, #5 и таблица 3.4, #5). Т.е. кратковременная выдержка (не более 10 с) стали 20Х23Н18 при температуре  $\approx 1400$  °С привела к хромированию и окислению немодифицированной лазерным излучением части поверхности с текстурой «Микроканалы № 2» не покрытой шлаком.

По результатам анализа СЭМ-изображений (рисунок 3.7г, #17–21), картирования (рисунок 3.8г) и элементного состава (таблица 3.4, #17–21) поверхности с текстурой «Микростолбики» установлено, что характерный размер первого фронта растекания шлака составляет порядка 4,3 мм, второго фронта до 5,1 мм. В первом фронте растекания зарегистрированы участки аналогичные референтной поверхности в первом фронте растекания с преимущественным преобладанием либо Ca (таблица 3.4, #17), либо Al (таблица 3.4, #17). Необходимо отметить, что локальные области с преобладанием Al формируются на участках, не

модифицированных лазерным излучением. Кальций в расплавленном состоянии стекает преимущественно в микроканалы. Последнее можно объяснить тем, что минеральные шлакообразующие вещества ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) являются сложными комплексными образованиями с изменяющимся типом структурных единиц (молекул) при изменении температуры. Поэтому температурная зависимость вязкости шлаков, от которой зависят характеристики течения шлака в жидком состоянии, отличается от классической экспоненциальной выведенной Я.И. Френкелем [101]. Прогнозировать характеристики растекания отдельных элементов, входящих в состав шлака, является еще более трудной, в настоящее время не решенной задачей. Соединение  $\text{Al}_2\text{O}_3$  характеризуется более высокими значениями температуры плавления, чем соединения  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Рост содержания алюминия в составе золы повышает её температуру плавления, а кальций понижает. Судя по полученным результатам, соединения кальция в составе минерального золошлакового состава, используемого в экспериментах, характеризуются лучшими характеристиками растекания по сравнению с соединениями алюминия. По этой причине Ca преимущественно преобладает в микроканалах поверхности с текстурой «Микростолбики», а также во втором фронте растекания текстур в виде микроканалов («Микроканалы № 1», «Микроканалы № 2», «Микростолбики») и в третьем фронте растекания на поверхности, обработанной абразивными материалами.

По результатам анализа второго фронта растекания шлака по поверхности «Микростолбики» получены аналогичные выводы и закономерности, установленные при анализе фронта II поверхности «Микроканалы № 2». Текстура поверхности во втором фронте не разрушена, в отличие от текстуры первого фронта. Закристаллизовавшийся минеральный расплав преимущественно содержится в микроканалах, из элементов минерального шлакообразующего вещества преобладает Ca. Часть поверхности, модифицированная лазерным излучением, значительно окислилась. Участки без шлака, не обработанные лазерным излучением, за счет выдержки при температуре 1400 °C окислились. А

их текстура из полированной трансформировалась в зернистую с размером зерен до 2,5 мкм, состоящих преимущественно из хрома и железа.

Необходимо отметить, что после проведения экспериментов по ошлакованию перед исследованиями поверхностей методами электронной микроскопии поверхности проходили очистку сжатым воздухом с давлением 1,5 – 2,0 атм. в течение 60 с. Видимое отслоение приповерхностного слоя в области расплава шлака было зарегистрировано только на поверхности «Анизотропная». На практике применяется обдувка внутренних полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева энергогенирирующего оборудования воздухом с давлением около 10 атм. для очистки от продуктов горения топлив. Из СЭМ-изображений (рисунок 3.7д, #22 – 23) хорошо видно, что в области формирования шлака поверхность разрушена. На текстуре вида «Анизотропная» условно выделен только один фронт растекания шлака. Из таблицы 3.4 #22 также, видно, что содержание элементов Са, Si и Al, входящих в состав шлака, в месте формирования шлака на поверхности «Анизотропная» (I фронта) много меньше по сравнению с другими видами текстур. Последнее обусловлено может быть только тем, что процедура обдувки поверхности удалила большую часть разрушенного приповерхностного слоя со шлаком. Можно сделать вывод о том, что при формировании шлака на поверхности с текстурой «Анизотропная» её верхний слой разрушается. На практике разрушенный слой может быть легко удален путем обдува воздухом. Из рисунка 3.7д #23 и таблицы 3.4 #23 видно, что выдержка текстуры «Анизотропная» при температуре 1400 °С привела к трансформации текстуры с развитой разноуровневой (рисунок 3.4г) на зернистую. Но в отличие от других текстур, используемых в экспериментах, размер зерна на текстуре «Анизотропная» не превышает 1,5 мкм.

В проведенных исследованиях в состав стали марки 20Х23Н18 и модельного состава золы входит железо. По этой причине, невозможно установить процентное соотношение изменения содержания железа в приповерхностном слое за счет процесса шлакования и за счет физико-химических процессов, происходящих в структурном составе, после выдержки стали при температуре 1400 °С. Элементы

Mn, Ni, Cr, входящие в состав стали, не содержатся в модельном составе золы. А элементы Al, Si и Ca не содержатся в стали, присутствуют только в шлаке. Выше было доказано, что после лазерной модификации поверхности стали с энергией в луче, достаточной для реализации процессов плавления и абляции металла, химический состав стали изменяется. На текстуре, сформированной лазерным излучением, химический состав различен даже между отдельными элементами (ребро микроканала, нижняя поверхность микроканала), образующих микроканал.

Для обобщения полученных выше выводов проведена оценка изменения химического состава в условно выделенных фронтах растекания шлака по сумме элементов Mn, Ni, Cr, входящих в состав стали, и по сумме элементов Al, Si, Ca, входящих в состав золы. Также в данной оценке использовались зарегистрированные данные о характерном размере участка поверхности, покрытой шлаком в каждом выделенном фронте растекания. Результаты сведены в таблицу 3.5. Так как химический состав отдельных элементов текстур в виде микроканалов, сформированных лазерным излучением, различен, то в таблице 3.5 приведены диапазоны суммы весового состава элементов Al+Si+Ca и элементов Mn+Ni+Cr.

Таблица 3.5 – Оценка изменения химического состава в условно выделенных фронтах растекания шлака и характерные размеры участков поверхности, покрытой шлаком

| Конфигурация текстур    | Фронт растекания | Сумма весового состава Al+Si+Ca, входящих в состав золы, % | Сумма весового состава Mn+Ni+Cr, входящих в состав стали, % | Характерный размер участка поверхности, покрытой шлаком, мм |
|-------------------------|------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Референтная поверхность | I                | 39,6                                                       | 0,5                                                         | 3,2                                                         |
|                         | II               | 0,5                                                        | 36,3                                                        | 3,8                                                         |
|                         | III              | 17,1                                                       | 16,7                                                        | 5,0                                                         |
| Микроканалы № 1         | I                | 34,8 – 39,4                                                | 0,9 – 6,1                                                   | 4,2                                                         |
|                         | II               | 24,3 – 27,1                                                | 5,6 – 7,2                                                   | 6,6                                                         |

Продолжение таблицы 3.5

|                 |    |              |             |           |
|-----------------|----|--------------|-------------|-----------|
| Микроканалы № 2 | I  | 1,0 – 41,7   | 1,8 – 32,5  | 4,0       |
|                 | II | 2,3 – 7,3    | 32,3 – 37,7 | 6,1       |
| Микростолбики   | I  | 39,0 – 39,5  | 0,1 – 0,2   | 4,3       |
|                 | II | 21,0 – 28,71 | 7,4 – 17,3  | 5,1       |
| Анизотропная    | I  | 8,1          | 26,2        | 3,6 – 4,7 |

Из таблицы 3.5 хорошо видно, что текстура «Анизотропная» демонстрирует наилучшие результаты по сопротивлению формированию шлаковых отложений и соответственного снижению его негативного воздействия на поверхности полурадационных и конвективных поверхностей котельного оборудования, изготовленных из стали. Текстура «Анизотропная» характеризуется наименьшим характерным размером участка поверхности, покрытой шлаком. Суммарный весовой состав элементов Al+Si+Ca, входящих в состав золы, много ниже средних значений, а весовой состав элементов Mn+Ni+Cr, входящих в состав стали, выше средних значений аналогичных характеристик по фронтам растекания других текстур. Последнее свидетельствует о том, что толщина сформированного слоя шлака на поверхности с текстурой «Анизотропная» наименьшая из рассматриваемых текстур в экспериментах.

Из текстур в виде микроканалов наилучший результат демонстрирует текстура «Микроканалы № 2». Последнее обусловлено более глубокими микроканалами в сравнении с текстурами «Микроканалы № 1» и «Микростолбики». Несмотря на то, что в первом фронте растекания шлака по текстуре «Микроканалы № 2» в микроканалах суммарное значение весового состава Al+Si+Ca достигает 41,7 %. Все же на данной текстуре содержание весового состава Mn+Ni+Cr выше, чем даже на референтной поверхности. Следовательно, и толщина слоя шлака на текстуре «Микроканалы № 2» меньше, чем на референтной поверхности и модифицированных лазерным излучением «Микроканалы № 1» и «Микростолбики».

### 3.2 Натурные испытания

На действующем объекте теплоэнергетики проведены натурные испытания нового подхода по снижению прочности адгезионного контакта золошлаковых отложений с теплопередающей поверхностью нагрева энергогенерирующего оборудования. Испытания проведены в течение 60 дней на котельной, работающей на буром угле марки ЗБ Балахтинского месторождения.

#### 3.2.1 Оборудование и методика обработки поверхностей стали

Испытания модифицированных полурадационных и конвективных поверхностей нагрева к осаждению продуктов горения угля и шлакованию проведены на действующей котельной с использованием жаропрочной, жаростойкой стали 20Х23Н18 [102]. Исследуемые поверхности стали выполнены в форме пластин размерами 25,0×25,0×2,0 мм (ширина × длина × толщина). Перед модификацией лазерным излучением поверхности стали полировались с применением абразивных материалов и алмазных паст по хорошо апробированной методике [88]. После абразивной обработки поверхности очищались в ультразвуковой ванне в среде метилового спирта от остатков абразивных материалов и алмазных паст. Модификация лазерным излучением проведена с использованием иттербиевого импульсного волоконного лазера (IPG-Photonics, Россия) при следующих характеристиках: длина волны 1064 нм, выходная мощность 50 Вт, частота импульсов 50 кГц, длительность 120 нс, энергия импульса 0,944 мДж. По результатам лабораторных исследований (глава 3.1) установлено, что поверхности стали, модифицированные лазерным излучением, с текстурами «Анизотропная» (многомодальная развитая шероховатость) и «Микроканалы № 2» (в виде параллельных микроканалов) способствуют уменьшению размера фронта растекания шлака по сравнению с поверхностями, обработанными абразивными материалами [86]. По этим причинам выбраны два вида текстур «Анизотропная» и «Микроканалы № 2». Формирование текстур лазерным излучением

осуществлялось по хорошо апробированной методике [86] с использованием двухосевого гальванометрического сканатора на базе привода «Cambridge Technology» VM2500+, входящего в устройство лазерной системы. В таблице 3.6 приведены характеристики, используемые для формирования текстур «Анизотропная» и «Микроканалы № 2».

Таблица 3.6. Характеристики для формирования текстур

| Конфигурация<br>текстур | Характеристики*                          |                                                  |                   |                    |                    |                |                |
|-------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
|                         | $V = d_{кр} \cdot x_v \cdot f$ ,<br>мм/с | $n = 1/(d_{кр} \cdot x_n)$ ,<br>мм <sup>-1</sup> | $d_{кр}$ ,<br>мкм | $x_v = l_v/d_{кр}$ | $x_n = l_n/d_{кр}$ | $l_v$ ,<br>мкм | $l_n$ ,<br>мкм |
| Анизотропная            | 219                                      | 228                                              | 87,6              | 0,05               | 0,05               | 4,4            | 4,4            |
| Микроканалы<br>№ 2      | 438                                      | 5,7                                              | 87,6              | 0,10               | 2,0                | 8,8            | 175,2          |

\* $V$  – скорость линейного перемещения луча лазера по поверхности;  $n$  – число проходов луча лазера;  $d_{кр}$  – диаметр абляционного кратера (определен экспериментально в условиях воздействия лазерного импульса на поверхность стали с характеристиками, приведенными выше);  $x_v$ ,  $x_n$  – относительные расстояния между центрами абляционных кратеров в продольном и поперечном направлениях движения луча лазера;  $l_v$ ,  $l_n$  – расстояния между центрами абляционных кратеров в продольном и поперечном направлениях движения луча лазера.

Лазерная модификация проводилась при температуре окружающей среды 21 °С, атмосферном давлении и относительной влажности около 45 %. Расстояния между центрами абляционных кратеров в продольном и поперечном направлениях движения луча лазера задавались для обеспечения условия 95 % наложения абляционных кратеров при формировании текстуры «Анизотропная» и 90 % наложение кратеров в продольном направлении при формировании текстуры «Микроканалы № 2». После нанесения текстуры поверхности стали очищались в изопропиловом спирте в ультразвуковой ванне в течение 120 с при частоте 40 Гц.

Испытания на котле проведены с использованием нескольких групп поверхностей. Каждая группа состояла из 10 образцов с идентичными текстурами. Каждой поверхности присвоен идентификационный номер. В качестве референтных поверхностей использовались поверхности стали, обработанные абразивными материалами.

Результаты измерений обрабатывались в соответствии со статистическими подходами. Многократные измерения усреднялись, вычислялся коэффициент вариации, среднеквадратичное отклонение и ширина доверительного интервала при доверительной вероятности не менее 93 %.

### **3.2.2 Котельная и топливо**

Испытания на прочность адгезионного контакта золошлаковых отложений к поверхностям стали проведены на котельной мощностью 1 200 кВт. В котельной установлено четыре автоматизированных твердотопливных котла Metex (Metex, Россия), номинальной мощностью 400 кВт каждый. На рисунке 3.9 приведены фотоизображения котельной и установленного в ней котла.



а)



б)

Рисунок 3.9 – Фотоизображения промышленной котельной: а) внешний вид котельной; б) автоматизированный котел Metex

На котельной в качестве топлива используется бурый уголь марки 3Б Балахтинского месторождения (Красноярский край, Россия). Характеристики угля приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Характеристики бурого угля марки 3Б Балахтинского месторождения

| Твердое топливо          | Технический анализ |              |                  |                             | Элементный состав |                  |                  |                  |                  |
|--------------------------|--------------------|--------------|------------------|-----------------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                          | $W^t$ ,<br>%       | $A^d$ ,<br>% | $V^{daf}$ ,<br>% | $Q_{s,v}^{daf}$ ,<br>МДж/кг | $C^{daf}$ ,<br>%  | $H^{daf}$ ,<br>% | $N^{daf}$ ,<br>% | $S^{daf}$ ,<br>% | $O^{daf}$ ,<br>% |
| Балахтинский бурый уголь | 20,8               | 6,2          | 44,6             | 29,33                       | 74,1              | 5,0              | 0,9              | 0,3              | 19,7             |

В образцах поверхностей металлов предусмотрены технологические отверстия диаметром 4 мм для крепления на специальном держателе в форме уголка. Крепление поверхностей металлов осуществлялось с помощью стальной

жаропрочной, жаростойкой проволоки. Металлический уголок с поверхностями стали устанавливался на внутренней стороне двери топки промышленного котла Metex. На рисунке 3.10 приведены фотоизображения держателя с поверхностями и его размещение в котле.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Фотоизображения крепления поверхностей: а) металлический держатель в форме уголка; б) внутренняя сторона двери топки котла

Период испытаний каждой группы поверхностей составлял не менее 60 суток, при следующих средних характеристиках работы котла: расход топлива – 80 кг/час; средняя нагрузка котла – 336 кВт. Параметры шнека подачи топлива: 30 секунд подача топлива, 45 секунд пауза. Параметры воздушного вентилятора – 2 215 об/мин с максимальной производительностью 485 м<sup>3</sup>/ч, при проведении испытаний мощность вентилятора составляла 50 %.

### **3.2.3 Методика оценки склонности угля к загрязнению продуктами горения поверхностей нагрева в топке котла**

Методика оценки склонности угля к загрязнению поверхностей нагрева в топке котла основана на данных об элементном составе золы. Элементный состав продуктов горения (золы) угля определяли по методу рентгенофлуоресцентного спектрального анализа (XRF) с помощью энергодисперсионного спектрометра

S2 RANGER (Bruker, Германия). Содержание элементов в оксидной форме приведено в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Содержание основных оксидов в золе угля марки 3Б Балахтинского месторождения

| Основные, мас. %               |      |     |                   | Кислые, мас. %   |                  |                                |                  |
|--------------------------------|------|-----|-------------------|------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> |
| 9,1                            | 24,1 | 3,1 | 0,6               | 0,9              | 46,1             | 15,1                           | 1,0              |

По хорошо известной методике [103–105] проведена оценка склонности золы угля марки 3Б Балахтинского месторождения к загрязнению поверхностей нагрева котла Метех. Для анализа использовали следующие компоненты золы – основные (*B*): оксид железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), оксид кальция (CaO), оксид магния (MgO), оксид натрия (Na<sub>2</sub>O) и оксид калия (K<sub>2</sub>O), и кислые (*A*): оксид кремния (SiO<sub>2</sub>), оксид алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и оксид титана (TiO<sub>2</sub>).

На первом этапе определялась температура, соответствующая началу шлакования минеральной части угля ( $t_{\text{slag}}$ ), которая зависит от отношения компонентов основного и кислого состава минеральной части по формулам [106]:  
Если  $B/A < 2,25$ :

$$t_{\text{slag}} = \frac{940 + 52,23}{B/A}; \quad (3.3)$$

если  $B/A \geq 2,25$ :

$$t_{\text{slag}} = 945 + 7,77 \cdot (B/A). \quad (3.4)$$

По результатам расчетов установлено, что температура начала шлакования Балахтинского угля марки 3Б составила  $t_{\text{slag}}=960$  °C.

Относительное ранжирование по склонности к образованию прочных железистых отложений выполнялось по рангам: низкий (0–0,25); средний (0,26–0,5); высокий (0,55–0,7); очень высокий свыше 0,7. Склонность к образованию прочных железистых отложений угля ( $P_{\text{Fe}}$ ) определялась по формуле [103,105]:

$$P_{\text{Fe}} = b_f - \frac{a_f}{(0,9 \cdot S_p^{\text{daf}} (100 - A^d) / A^d + 0,813 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)}, \quad (3.5)$$

где  $S_p^{\text{ash}}$  – содержание пиритной серы в горючей массе, %;  $a_f$ ,  $b_f$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от топлива;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – содержание железа в минеральной части топлива, %,  $A^d$  – зольность топлива на сухую массу, %.

Относительное ранжирование по склонности к образованию загрязнений на базе активных щелочей выполнялось по рангам [107,108]: низкий 0 – 0,25; средний 0,26 – 0,65; высокий выше 0,65. Склонность к образованию загрязнений на базе активных щелочей ( $P_{\text{Na}}$ ) определялась как:

$$P_{\text{Na}} = 0,416 \cdot (0,95 \cdot \text{Na}_2\text{O} - 0,11 \cdot \text{K}_2\text{O} - 0,05)^{0,313} \quad (3.6)$$

где  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  – соответственно содержание оксида натрия и оксида калия в минеральной части топлива, %.

Относительное ранжирование по склонности к сульфатно-кальциевым отложениям определялось по рангам [103,105]: низкий, при отсутствии отложений 0 – 0,42; средний 0,43 – 0,6; высокий выше 0,8. Склонность к образованию прочных сульфатно-кальциевых отложений  $P_{\text{Ca}}$  определялась по формуле:

$$P_{\text{Ca}} = 0,5 \cdot (\text{CaO} \cdot (1 - 0,0025A^d) - 0,05)^{0,22} - P_{\text{Na}}, \quad (3.7)$$

где  $\text{CaO}$  – содержание оксида кальция в минеральной части топлива, %.

Относительное ранжирование склонности угля к шлакованию топочных экранов может разделяться на следующие ранги [103,105]: низкий ( $<0,42$ ); средний ( $0,42 \div 0,62$ ); высокий ( $0,62 \div 0,75$ ); очень высокий ( $>0,75$ ). Индекс склонности угля к шлакованию топочных экранов ( $R_S$ ) определен по формуле:

$$R_S = 0,707 \cdot (P_{\text{Fe}}^2 + (1 - 0,025 \cdot (B/A))^2)^{0,5}. \quad (3.8)$$

### 3.2.4 Методы и методики исследования поверхностей стали

С помощью аналитических весов Vibra AF 225DRCE (Shinko Denshi CO. LTD, Япония, дискретность  $10^{-6}$  г, класс точности I) определялась масса отложений

продуктов горения угля. Поверхности взвешивались до и после проведения испытаний на котле.

При оценке стойкости поверхностей стали к осаждению продуктов горения топлив и шлакованию образцы проходили процедуру очистки воздухом давлением 10 атм. с помощью поршневого компрессора Fini MK103-200-3M ADVANCED (Fini Compressors S.p.A., Италия). В результате проведения очистки с поверхности удалялась рыхлая часть отложений, состоящая преимущественно из золы. Отложения в условиях штатной эксплуатации котлов удаляются во время технического обслуживания одним из подходов: обдувка потоком воздуха или пара, гидроструйная очистка. Оставшиеся на поверхностях локальные загрязнения продуктами горения представляют собой преимущественно золошлаковые наросты.

При помощи сканирующего электронного микроскопа TM4000 (Hitachi, Япония), оснащенного Bruker Quantax 75 (Bruker Nano GmbH, Германия) методом микроскопии проведен анализ текстуры поверхностей металлов, методом рентгеноспектрального микроанализа определен весовой состав химических элементов. Изображения получены в обратно отраженных электронах при ускоряющем напряжении 20 кЭВ. Локальный химический анализ выполнен с помощью встроенного энергодисперсионного спектрометра в СЭМ. Весовой состав химических элементов усреднялся по результатам трех измерений в аналогичных локальных областях. Разброс значений не превышал 3,0 %.

### **3.2.5 Результаты и обсуждение**

#### **3.2.5.1 Анализ склонности угля к загрязнению продуктами горения поверхностей нагрева в топке котла**

Результаты расчетов склонности угля, использованного при натурных испытаниях, к загрязнению поверхностей нагрева представлены на рисунок 3.11. Для исследуемого угля ранжирование по склонности к образованию прочных

железистых отложений находится в ранге – Высокий; склонности к образованию загрязнений на базе активных щелочей находится в ранге – Низкий; склонность к сульфатно-кальциевым отложениям находится в ранге – Высокий; склонность к шлакованию топочных экранов находится в ранге – Очень высокий вследствие высокого содержания оксидов кремния и алюминия (таблица 3.3), влияющих на увеличение склонности к золоотложению и последующему шлакованию.

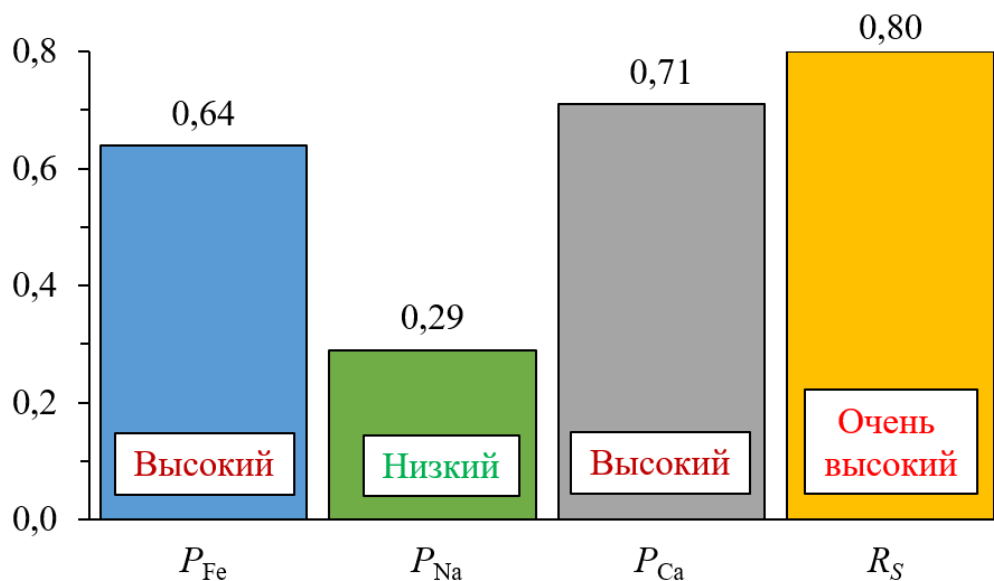


Рисунок 3.11 – Результат анализа склонности угля к загрязнению поверхностей нагрева продуктами горения.  $P_{Fe}$  – прочные железистые отложения;  $P_{Na}$  – загрязнения на базе активных щелочей;  $P_{Ca}$  – сульфатно-кальциевые отложения;  $R_S$  – шлакование топочных экранов

Можно сделать вывод о том, что при сжигании угля марки ЗБ Балахтинского месторождения в топке котла будут формироваться прочные железистые и сульфатно-кальциевые отложения на поверхностях нагрева, что будет оказывать негативное влияние на эффективность работы котла.

### 3.2.5.2 Анализ характеристик поверхностей стали

На рисунке 3.12 приведены фотоизображения типичных поверхностей стали до испытаний на склонность поверхностей к загрязнению продуктами горения угля, после испытаний, а также после очистки воздухом давлением 10 атм.

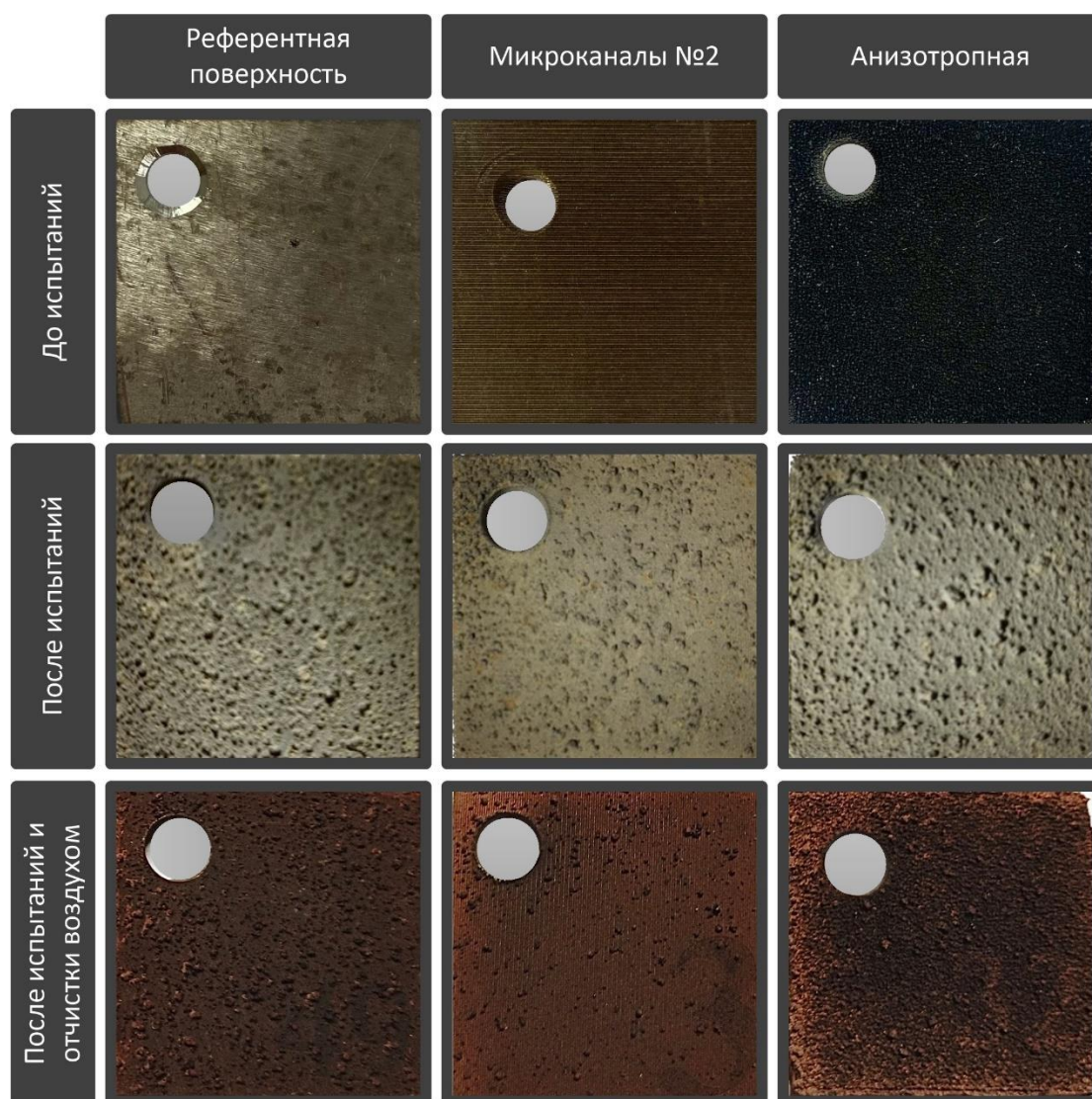
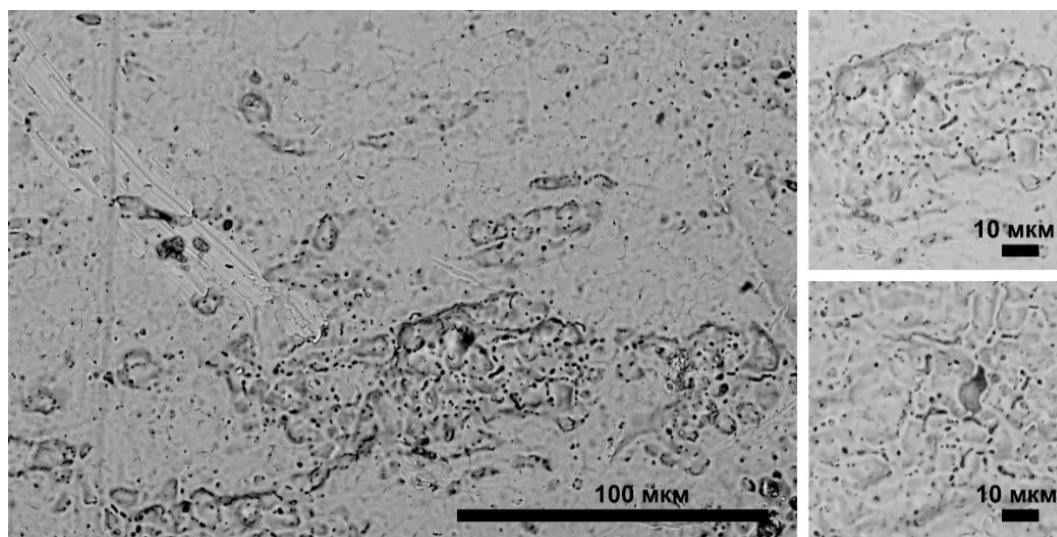


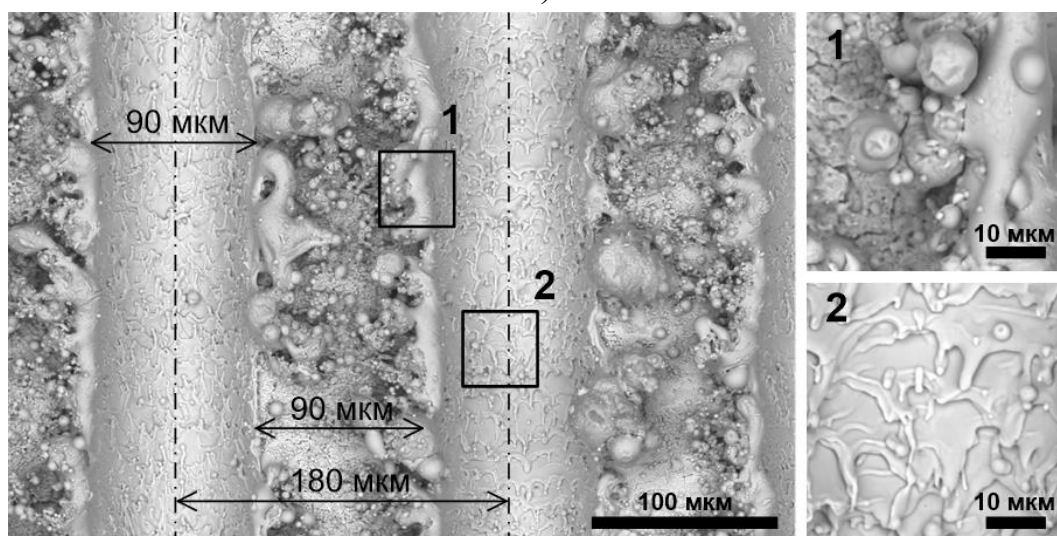
Рисунок 3.12 – Типичные фотоизображения поверхностей стали до испытаний на склонность поверхностей к загрязнению продуктами горения угля, после испытаний, после очистки воздухом давлением 10 атм.

На рисунках 3.13 и 3.14 приведены СЭМ-изображения микротекстур до испытаний на склонность поверхностей стали к загрязнению продуктами горения

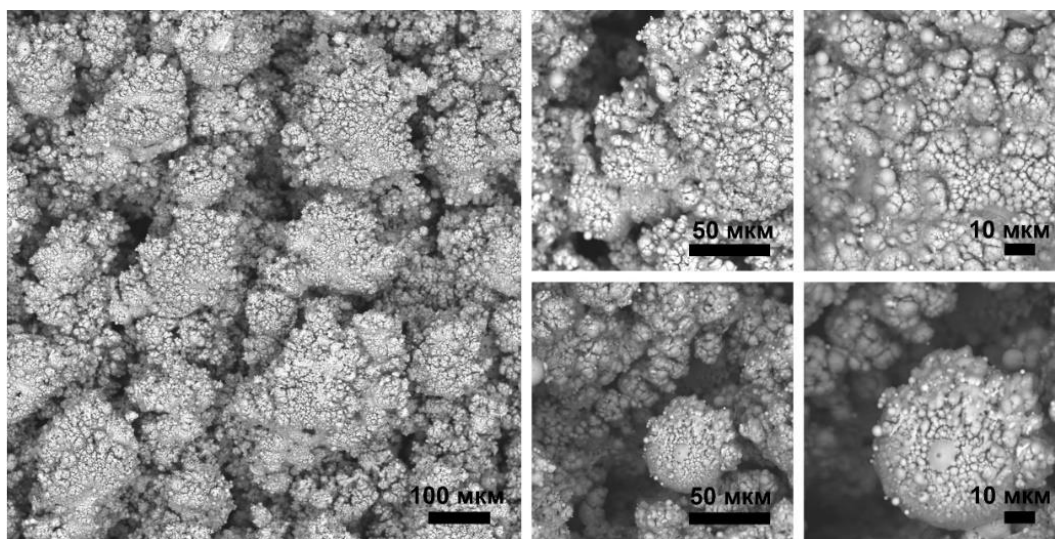
угля и после очистки воздухом давлением 10 атм. СЭМ-изображения поверхностей стали непосредственно после испытаний не приведены. Последнее обусловлено тем, что на их поверхности содержатся легколетучие рыхлые отложения, которые технически невозможно исследовать на сканирующем электронном микроскопе без их деформации/разрушения или повреждения микроскопа.



а)

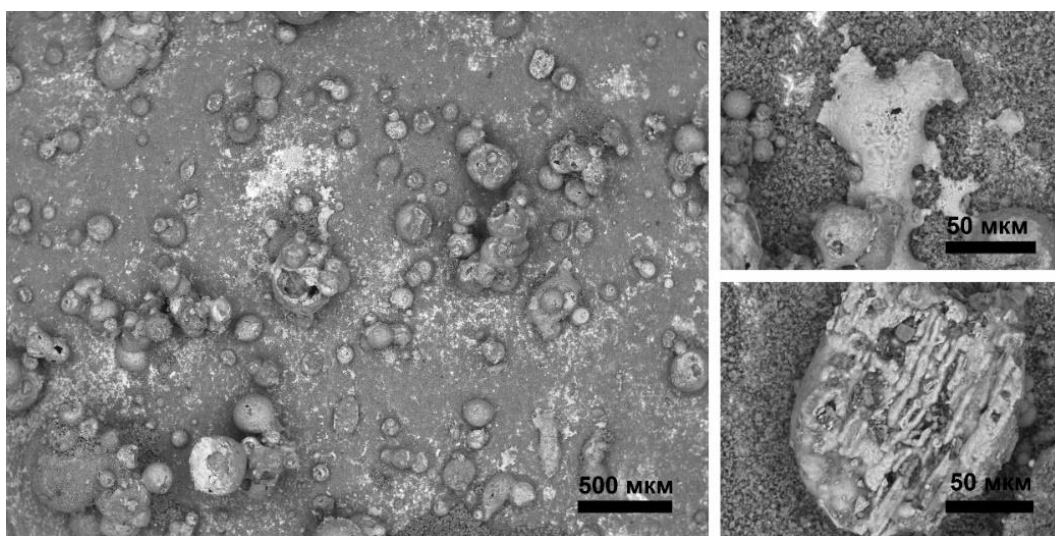


б)



в)

Рисунок 3.13 – Типичные СЭМ-изображения поверхностей стали до испытаний на склонность поверхностей к загрязнению продуктами горения угля: а) Референтная поверхность; б) «Микроканалы № 2»; в) «Анизотропная»



а)

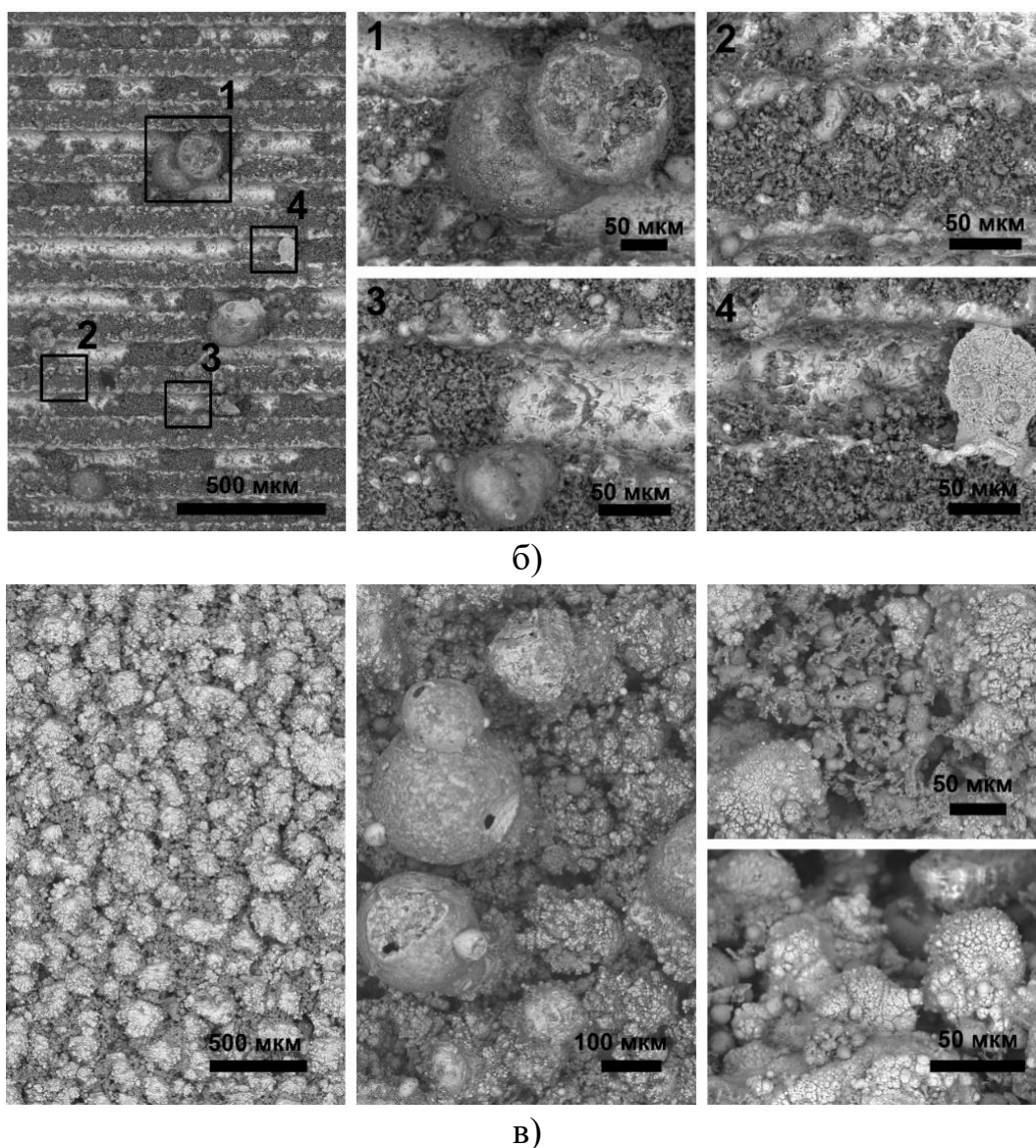


Рисунок 3.14 – Типичные СЭМ-изображения поверхностей стали после испытаний на склонность поверхностей к загрязнению продуктами горения угля и очистки воздухом давлением 10 атм.: а) Референтная поверхность; б) «Микроканалы № 2»; в) «Анизотропная»

По результатам анализа фотоизображений (рисунок 3.12) и СЭМ-изображений (рисунок 3.13а) установлено, что текстура неоднородна по поверхности стали, обработанной абразивными материалами. По поверхности расположены каверны и поры, а также следы проката стали в виде кристаллизованного расплава.

Лазерным излучением наносекундной длительности сформированы текстуры с заданными геометрическими характеристиками «Микроканалы № 2» (рисунок 3.11б) и «Анизотропная» (рисунок 3.11в).

Текстура «Микроканалы № 2» состоит из параллельных углублений полуцилиндрической формы шириной около 90 мкм. Последнее близко значению диаметра абляционного кратера 87,6 мкм. По заданному направлению движения луча лазера сформированы микроканалы в результате процессов плавления и абляции металла. Расстояние между осями движения луча лазера задавалось 180 мкм. Из СЭМ-изображений ((рисунок 3.11б) «до испытаний») видно, что межосевое расстояние микроканалов составляет около 180 мкм, т.е. соответствует заданному значению. Между микроканалами расположена область поверхности, по которой не осуществлялось воздействие луча лазера. Ширина таких областей составляет около 90 мкм. Но за счет процесса абляции металла и последующей конденсации паров металла на этих немодифицированных участках, сформировались сферы и струи при кристаллизации расплава металла (рисунок 3.11б, «до испытаний»). Из рисунка 3.11б видно, что «до испытаний» нижняя поверхность микроканалов (дно микроканалов) характеризуется меньшей шероховатостью по сравнению с немодифицированной областью, покрытой продуктами кристаллизации расплава металла. Текстура нижней поверхности микроканалов состоит из струй кристаллизовавшегося расплава металла.

Текстура «Анизотропная» ((рисунок 3.11в) «до испытаний») разноуровневая, подобна агломератам размером от нескольких микрометров до 1 мм, на которых расположены частицы более мелких размеров. Этот вид текстуры сформирован в результате многократного повторного воздействия луча лазера. По этой причине текстура состоит преимущественно из продуктов кристаллизовавшегося расплава металла, образующегося в окрестностях области абляции.

Из рисунка 3.14 («до испытаний») видно, что поверхность стали, обработанная абразивными материалами, имеет металлический цвет. Поверхности стали с текстурой «Микроканалы № 2» имеют коричневый цвет, а с текстурой «Анизотропная» – черный. Изменение цвета стали в результате обработки

лазерным излучением хорошо изучено [109] и объясняется изменением элементного состава. Из рисунка 3.12 («после испытаний») видно, что поверхности стали после извлечения из топки котла имеют идентичный пепельно-серый цвет. Последний обусловлен формированием на поверхностях слоя отложений золы. После обдувки воздухом рыхлые отложения были удалены с поверхностей стали. Их цвет изменился преимущественно на красно-коричневый (рисунок 3.12 «после очистки воздухом»), а на поверхностях остались продукты горения топлива с прочным адгезионным контактом. Изменение цвета на красно-коричневый произошло вследствие еще большего окисления поверхностей стали. Также из рисунка 3.12 («после очистки воздухом») видно, что после очистки воздухом поверхность стали с текстурой «Микроканалы № 2» менее загрязнена продуктами горения по сравнению с поверхностью, обработанной абразивными материалами. Последнее свидетельствует о том, что обработка поверхностей сталей лазерным излучением позволяет снизить прочность адгезионного контакта продуктов горения топлив. Анализ текстуры поверхностей стали после обдувки воздухом методом микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа подтвердил вышеприведенный вывод. Из СЭМ-изображений (рисунок 3.14 «после очистки воздухом») видно, что поверхность стали, обработанная абразивными материалами, покрыта слоем продуктов горения топлив. Присутствует лишь незначительное число локальных областей размером до десятка микрометров, имеющих металлический цвет, т.е. очищенных потоком воздуха. На этой же поверхности сформировались крупные, размером до сотен микрометров частицы продуктов горения угля преимущественно в сферической форме. Явно, что число таких частиц на единицу площади поверхности на образцах с текстурой «Микроканалы № 2» существенно меньше. Кроме того, из СЭМ-изображений видно, что на нижней поверхности микроканалов больше участков, имеющих металлический цвет, а также на этих участках отсутствуют продукты горения топлива по сравнению с поверхностью стали, обработанной абразивными материалами. Последнее свидетельствует о том, что поверхность с текстурой «Микроканалы № 2» лучше очищена потоком воздуха по сравнению с

референтной поверхностью. Поверхности с текстурой «Анизотропная» также имеют больше участков, очищенных от продуктов горения топлива по сравнению с референтной поверхностью стали. Но эти участки в основном являются выступами на текстуре. В углублениях находятся продукты горения угля. Однозначного же вывода о степени очистки поверхностей с текстурой в «Анизотропная» невозможно сделать по СЭМ-изображениям в связи с развитой, многомодальной шероховатостью.

В таблице 3.9 приведены среднеарифметические значения массы поверхностей, измеренных до испытаний, после испытаний и после очистки воздухом. Также в таблице 3.9 приведена масса рыхлых отложений (золы), масса отложений с прочным адгезионным контактом и общая масса отложений на поверхностях.

Таблица 3.9 – Масса продуктов горения топлива

| Конфигурация<br>текстур    | $M_{\text{test}}^{\text{before}}$ , г | $M_{\text{test}}^{\text{after}}$ , г | $M_{\text{clean}}^{\text{after}}$ , г | $M_{\text{ash}}$ , г | $M_{\text{adhes}}$ , г | $M_{\text{total}}$ , г |
|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| Референтная<br>поверхность | 9,0633                                | 9,3335                               | 9,2754                                | 0,0581               | 0,2121                 | 0,2702                 |
| Микроканалы № 2            | 9,0523                                | 9,1934                               | 9,1704                                | 0,0230               | 0,1181                 | 0,1411                 |
| Анизотропная               | 8,5123                                | 8,7560                               | 8,6551                                | 0,1009               | 0,1428                 | 0,2437                 |

\*  $M_{\text{test}}^{\text{before}}$  – масса поверхности до испытаний, г;  $M_{\text{test}}^{\text{after}}$  – масса поверхности после испытаний, г;  $M_{\text{clean}}^{\text{after}}$  – масса поверхности после очистки воздухом, г;  $M_{\text{ash}}$  – масса рыхлых отложений (золы),  $M_{\text{ash}} = M_{\text{test}}^{\text{after}} - M_{\text{clean}}^{\text{after}}$ , г;  $M_{\text{adhes}}$  – масса отложений с прочным адгезионным контактом,  $M_{\text{adhes}} = M_{\text{clean}}^{\text{after}} - M_{\text{test}}^{\text{before}}$ , г;  $M_{\text{total}}$  – общая масса отложений,  $M_{\text{total}} = M_{\text{ash}} + M_{\text{adhes}}$ , г.

По результатам анализа данных, представленных в таблице 3.9, сделаны выводы о том, что на поверхностях стали, обработанных абразивными материалами, масса отложений с прочным адгезионным контактом, оставшихся после очистки воздухом, а также общая масса отложений, включая золу, больше значений аналогичных характеристик, зарегистрированных на поверхностях с

текстурами, сформированными лазерным излучением. Судя по массе отложений  $M_{ash}$  (таблица 3.9) текстура «Анизотропная» продемонстрировала худший результат по сопротивлению к загрязнению рыхлыми отложениями (золой). Последнее обусловлено тем, что на текстуре «Анизотропная» загрязнения рыхлыми отложениями концентрируются в углублениях шероховатости (рисунок 3.14). Очистка воздухом давлением 10 атм. не позволила удалить эти загрязнения. Очищение воздухом произошло только с вершин элементов, формирующих шероховатость на текстуре «Анизотропная» (рисунок 3.14).

По результатам анализа изменения массы поверхностей (таблица 3.9), фотоизображений (рисунок 3.12) и СЭМ-изображений (рисунок 3.14) можно сделать вывод о том, что жаропрочная, жаростойкая сталь 20Х23Н18 с текстурой поверхности, сформированной лазерным излучением наносекундной длительности, характеризуется повышенной стойкостью к осаждению продуктов горения и шлакованию по сравнению с традиционно применяемой на практике сталью, обработанной абразивными материалами. Но необходимо отметить, что используемые в испытаниях текстуры «Микроканалы № 2» и «Анизотропная» не являются лучшими из потенциально возможных. Проведенные испытания показали, что текстура «Анизотропная» хоть и характеризуется повышенной стойкостью к загрязнениям с прочным адгезионным контактом к поверхности, но за счет развитой многомодальной шероховатости данный вид текстуры склонен к большому скоплению рыхлых отложений (золы). Последние невозможно очистить потоком воздуха с давлением 10 атм. Повышенную стойкость к осаждению рыхлых отложений (золы) и загрязнений с прочным адгезионным контактом продемонстрировала сталь с текстурой «Микроканалы № 2». Этот вид текстуры характеризуется большей шероховатостью по сравнению с шероховатостью поверхностей стали, обработанных абразивными материалами. Следовательно, можно сделать вывод, что повышенная стойкость к осаждению продуктов сгорания поверхности с текстурой «Микроканалы № 2» обусловлена не только текстурой, но и элементным составом, изменённым при лазерной модификации. В настоящее время основным подходом по снижению шлакования поверхностей нагрева в

топках котла является подход, базирующийся на изменении состава топлива путем добавления различных присадок, например, раствора лактата алюминия [45], минеральных добавок (Si–Al, Al, и Mg) [44], кальция [43]. Для каждого вида топлива разработано не менее десятка различных по составу присадок. Несмотря на хорошую эффективность влияния присадок на снижение отложений на полурadiaционных и конвективных поверхностях нагрева этих мер недостаточно для обеспечения длительной работы котла без вынужденного технического обслуживания на механическую очистку. По этим причинам развитие подхода по снижению шлакования поверхностей нагрева, основанного на модификации приповерхностного слоя металла, является актуальным. Исследований в рамках этой тематики на настоящее время выполнено недостаточно для разработки полноценной теории. Но известно [110], что формирование оксидного слоя на поверхностях металлов позволяет значительно повысить их стойкость к загрязнениям с прочным адгезионным контактом продуктов горения углеводородных топлив. Ранее в предыдущих исследованиях [86] был изучен элементный состав поверхностей сталей, модифицированных аналогичным способом. В [86] установлено, что при формировании текстур «Анизотропная» и «Микроканалы» в результате лазерной обработки происходит рост содержания кислорода и углерода в модифицированном приповерхностном слое стали. Также экспериментально установлено [86], что в приповерхностном слое, модифицированном лазерным излучением, изменяется содержание основных элементов Mn, Ni, Cr и Fe, входящих в состав стали. В качестве гипотезы на основании выполненных исследований предположено, что наибольший вклад в снижение прочности адгезионного контакта продуктов горения углеводородных топлив вносят оксиды металлов, формирующиеся на поверхностях стали при лазерной модификации в воздушной среде.

### **3.2.5.3 Анализ элементного состава поверхностей стали после проведения натуральных испытаний и очистки воздухом**

После проведения натуральных испытаний и очистки потоком воздуха проведена оценка элементного состава поверхностей стали. Полученные результаты приведены на рисунках 3.15 – 3.17.

Референтная поверхность стали (обработанная абразивными материалами) (рисунок 3.15, область 1) покрыта плотным слоем оксидов хрома (рисунок 3.5, область 2), поверх которого располагается слой искаженных кристаллов феррохромитов цинка (рисунок 3.15, область 3), по которому развиваются сплошные объемные дендритные структуры из сплавленных сферических элементов размером 3–5 мкм. Шлаковые дендритные структуры представлены в основном глобулами фосфата кальция (рисунок 3.15, область 5) с небольшой примесью пластинчатого сульфата кальция (3–5 % по сере) (рисунок 3.15, область 4). Инкрустация шлаковых глобул фосфата кальция представлена преимущественно металлическим цинком (до 80 % масс.) (рисунок 3.15, область 6 – белые «чешуйки»). Установлено, что на поверхности сформировались микросферы (до 30 мкм), состоящие из железа (до 45 %) с примесью цинка (до 25 %) (рисунок 3.15, область 7). Поверхность микросфер покрыта слоем сульфата кальция. Микросферы не содержат хрома и никеля, следовательно, они не являются результатом выхода расплава материала на поверхность, а образованы при плавлении минеральной части угольной золы. Микросферы при дальнейшей эксплуатации могут служить инициаторами коррозии с последующим разрушением поверхностей нагрева.

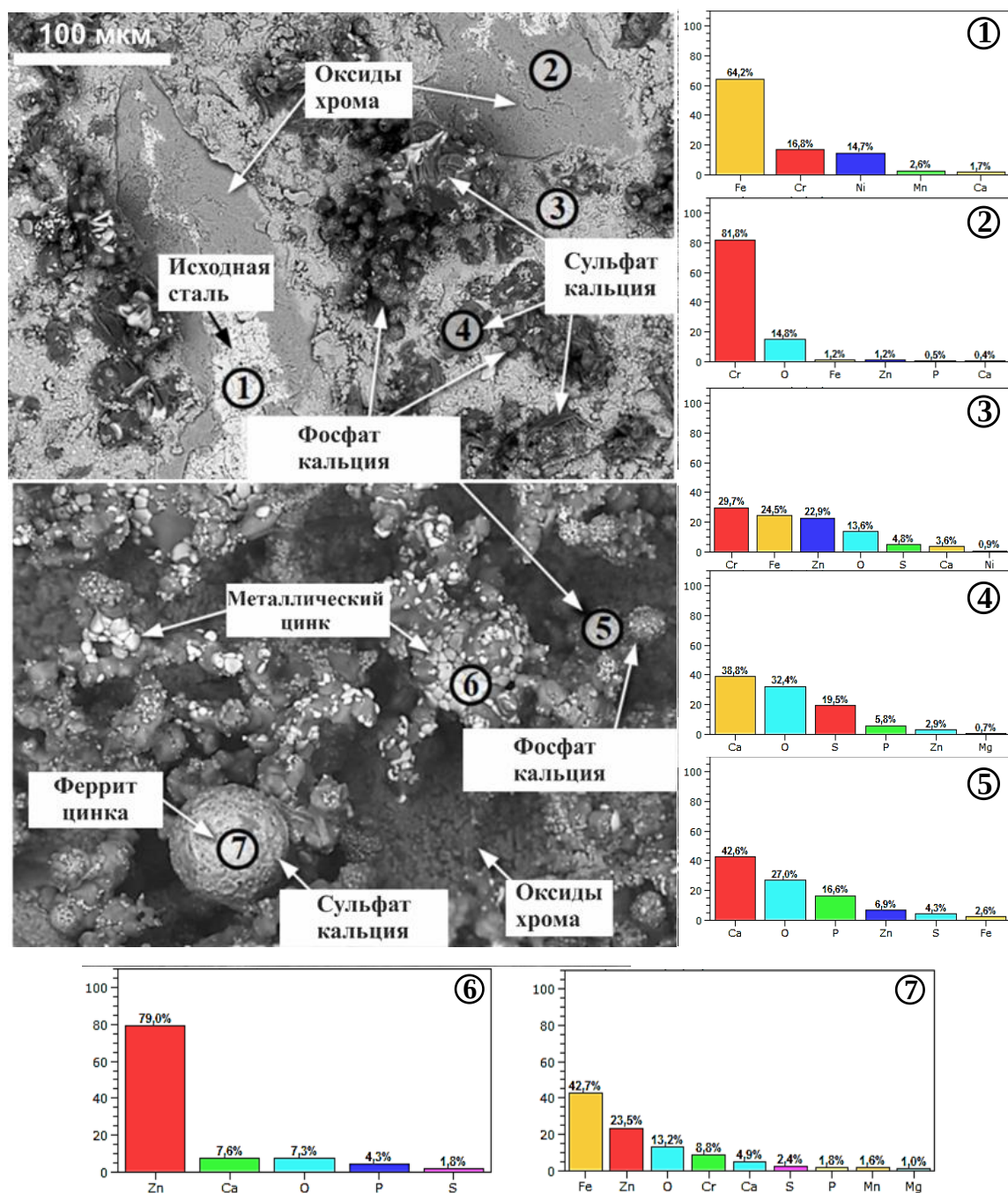


Рисунок 3.15 – Результаты анализа элементного состава референтной поверхности, (обработанная абразивными материалами)

На рисунке 3.16 приведены результаты анализа элементного состава поверхностей стали с текстурой «Микроканалы № 2». Нетекстурированные лазерным излучением части поверхностей, формирующие ребра микроканалов, покрыты фосфатом кальция (рисунок 3.16, область 1). Ребра микроканалов инкрустированы не оплавленными тетраэдрами сложного состава (ферриты-

манганиты-хромиты цинка) (рисунок 3.16, область 2). Также на ребрах зарегистрированы продукты плавления минеральной части угольной золы. Последние характеризуются высокой долей железа при отсутствии хрома и никеля. На участках, содержащих железо, расположены частицы сульфата кальция, образованные в результате оседания продуктов сгорания угля.

Текстурированная часть поверхности, образующая дно микроканалов, покрыта слоем искаженных тетраэдрических кристаллов оксидов, состоящих преимущественно из хрома и марганца (рисунок 3.16, область 3). Эти кристаллы могли быть сформированы только в результате выхода расплава из стали. На дне микроканалов зарегистрированы отдельные участки озоления, содержащие угловатые частицы сульфата кальция (рисунок 3.16, область 4), покрытые кристаллизовавшимися каплями расплава цинка (рисунок 3.16, область 5). Также на дне микроканалов присутствуют микросферы, состоящие преимущественно из силиката кальция и оксида кремния.

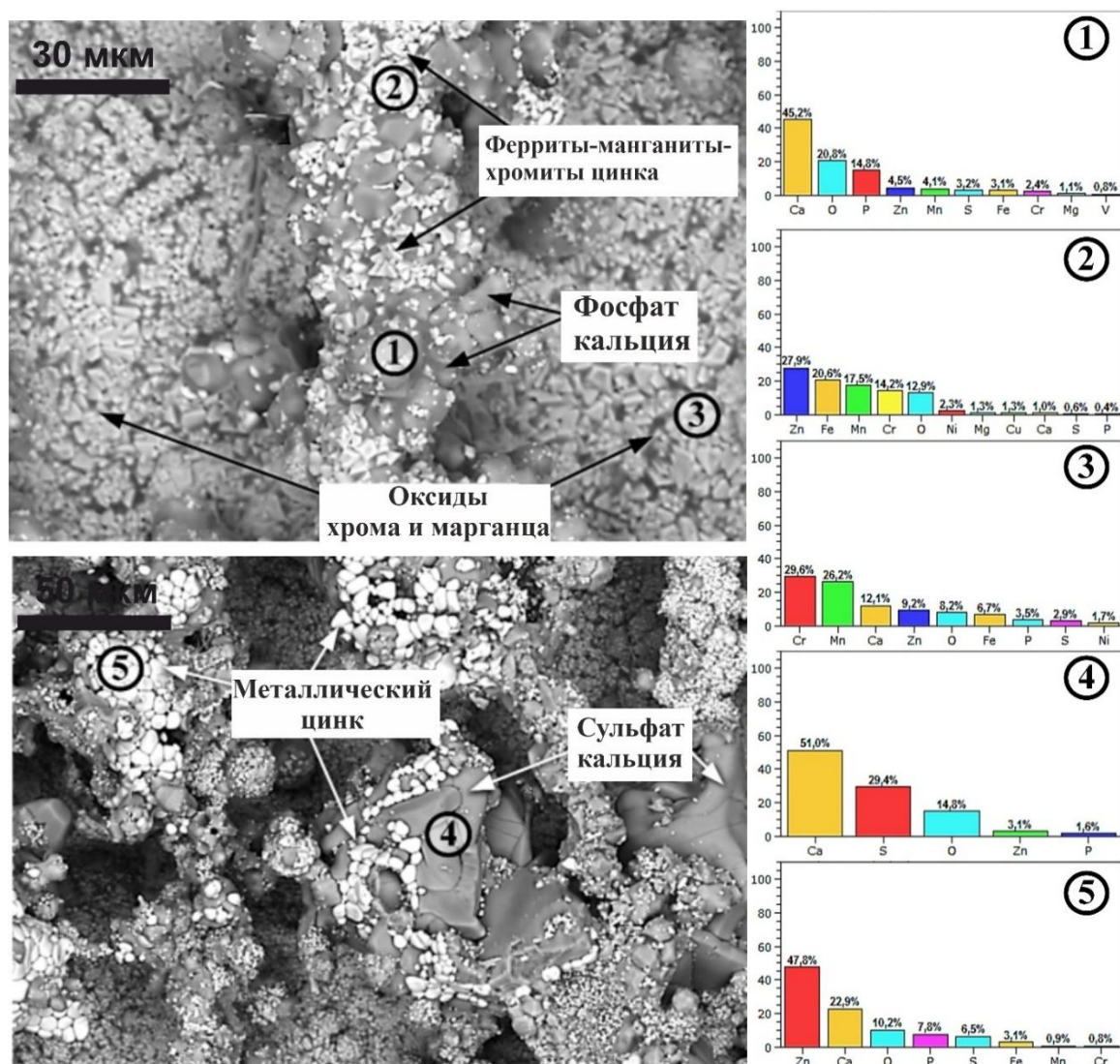


Рисунок 3.16 – Результаты анализа элементного состава поверхности с текстурой «Микроканалы № 2»

Поверхность образцов с текстурой «Анизотропная» после проведения натурных испытаний и очистки воздухом покрыта плотным слоем продуктов горения топлива за исключением вершин выступов (рисунок 3.17). На поверхности сформировались микросферы диаметром 10–20 мкм, состоящие из фосфата кальция, часто инкрустированные белыми чешуйками металлического цинка (рисунок 3.17, область 2) и мелкими тетраэдрами феррита цинка с примесью хромита и манганита цинка (рисунок 3.17, область 1). Установлено, что поверхности с текстурой «Анизотропная», в отличие от текстуры «Микроканалы № 2», менее устойчива к отложениям продуктов горения топлива. Это связано с особенностями образованной лазерным излучением развитой

многомодальной структуры, которая, с одной стороны, повышает эффективную площадь теплообменной поверхности и ее способность к теплообмену, но, с другой стороны, ведет к осаждению частиц золы в неровностях и полостях поверхности, затрудняя возможность очистки при обдуве воздушным потоком.

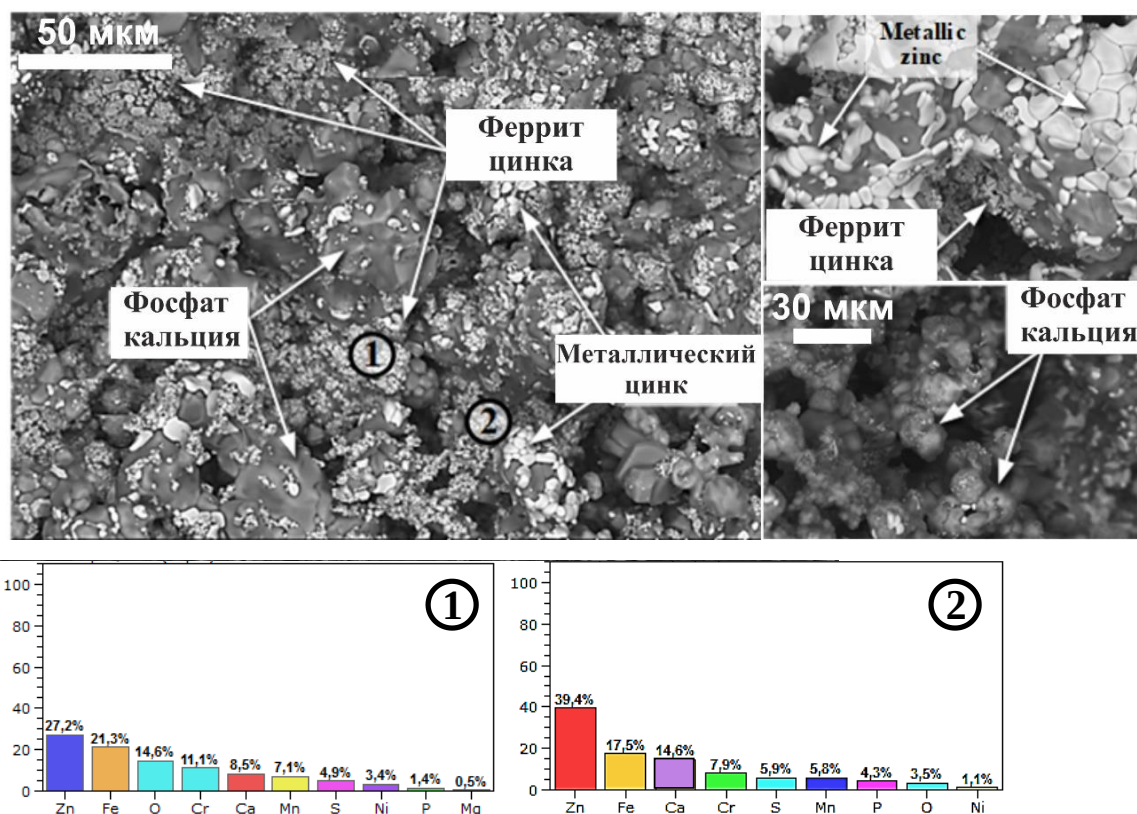


Рисунок 3.17 – Результаты анализа элементного состава поверхностей, с текстурой «Анизотропная»

По результатам проведенного анализа элементного состава поверхностей стали после натурных испытаний и очистки потоком воздуха подтвердились выводы о том, что при сжигании угля марки ЗБ Балахтинского месторождения в топке котла формируются прочные железистые и сульфатно-кальциевые отложения. Повышенной стойкостью к осаждению продуктов горения топлива из исследуемых поверхностей стали характеризуются поверхности с текстурой «Микроканалы № 2».

### Выводы по главе 3

1. Лазерная модификация приповерхностного слоя стали 20Х23Н18 кардинально изменяет в нем соотношение весового состава химических элементов, входящих в состав стали. Показано, что весовой состав химических элементов на текстурах в виде микроканалов достаточно сильно различается в области нижней поверхности микроканала, на боковом ребре и на нетекстурированной части вблизи микроканала. Установлено, что ребра микроканалов, сформированные лазерным излучением, характеризуются повышенной твердостью, прочностью и прокаливаемостью, но также характеризуются более низкой стойкостью к хрупкому разрушению, коррозии, жаропрочности, упругости по сравнению с функциональными свойствами стали, обработанной абразивными материалами. При условии осаждения паров металла, образующихся при лазерной обработке, на нетекстурированную часть вблизи микроканала, в таком приповерхностном слое повышается прочность и пластичность, но снижается ударная вязкость, теплопроводность, жаропрочность и упругость.

2. Установлено, что в условиях, соответствующих кратковременному (до 10 секунд) аварийному режиму работы энергогенерирующего оборудования при достижении температуры поверхностей нагрева около 1400 °С, достаточной для формирования шлака из золы, изменяется весовой элементный состав стали 20Х23Н18. Помимо известного окисления установлен значительный рост содержания хрома (до 47 %) и трансформация текстуры с формированием зерен размером до 2,5 мкм. Показано, что лазерная обработка поверхности позволяет значительно повысить стойкость стали к таким изменениям, а также уменьшить размер образующихся зерен до 1,5 мкм.

3. Установлено значительное влияние текстуры поверхности стали на динамику и температурные характеристики физико-химических трансформаций зольного состава, включая его плавление.

4. Установлено, что от вида и характеристик текстуры поверхностей стали 20Х23Н18, нагретой до температур 1300–1400 °С зависят характеристики

фронтов растекания шлака. На поверхностях, обработанных абразивными материалами, условно можно выделить три фронта растекания. На поверхностях, модифицированных лазерным излучением наносекундной длительности с текстурой в виде микроканалов, условно можно выделить два фронта растекания. На текстуре «Анизотропная» зарегистрирован один фронт растекания.

5. Установлено, что лазерная модификация с получением развитой многоуровневой текстуры «Анизотропная» является перспективным подходом для снижения интенсивности шлакования конвективных и полурadiaционных стальных поверхностей оборудования, на которых формируется золошлаковый слой. В результате модификации создаются условия смещения температур формирования шлака в область более высоких значений (выше на 60–75 °С по сравнению с немодифицированной сталью).

6. Текстура «Анизотропная» способствует уменьшению размера фронта растекания шлака, а также позволяет более эффективно проводить процедуру очистки (удаление сжатым воздухом разрушенного приповерхностного слоя со шлаком). Эти особенности позволяют значительно уменьшить толщину формируемого шлака на поверхностях нагрева и повысить надежность теплотехнического оборудования.

7. В течение 60 суток проведены испытания модифицированных лазерным излучением поверхностей нагрева на действующей котельной с использованием котлов мощностью 400 кВт, работающих на буром угле марки ЗБ Балахтинского месторождения. По результатам расчетов установлено, что при сжигании угля марки ЗБ Балахтинского месторождения в топке котла формируются прочные железистые и сульфатно-кальциевые отложения на поверхностях нагрева. Весовым методом, установлено, что поверхности с текстурой «Анизотропная» продемонстрировали худший результат по сопротивлению к загрязнению рыхлыми отложениями (золой), наилучший результат продемонстрировали поверхности с текстурой «Микроканалы № 2». Но после очистки поверхностей воздухом давлением 10 атм. в течение 2 минут, наихудший результат по прочности адгезионного контакта железистых и

сульфатно-кальциевых отложений продемонстрировала поверхность стали, обработанная абразивными материалами. Пониженной прочностью адгезионного контакта железистых и сульфатно-кальциевых отложений с поверхностью, характеризуется сталь с текстурой «Микроканалы № 2». Последнее также доказано результатами исследований методами сканирующей микроскопии и рентгенофлуоресцентного спектрального анализа. Результаты последнего свидетельствуют, что наибольший вклад в снижение прочности адгезионного контакта продуктов горения углеводородных топлив с поверхностью вносят оксиды металлов, формирующиеся на поверхностях стали при лазерной модификации в воздушной среде.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан новый подход к интенсификации испарения капель в системах охлаждения капельным орошением, основанный на модификации интенсивными потоками энергии (лазерным излучением) геометрических параметров и приповерхностных свойств теплопередающих поверхностей, а также к интенсификации теплообмена в энергогенерирующем оборудовании за счет снижения прочности адгезионного контакта продуктов горения твердого топлива с теплопередающими поверхностями.

2. Выбор дизайна (конфигурации и расположения) поверхности, участки которой характеризуются различными свойствами смачивания, оказывает влияние не только на интенсивность испарения теплоносителя, но в случае комбинации экстремальных свойств смачивания на бифильных поверхностях, является доминирующим фактором формирования сухих пятен за счет разрушения паровых пузырей на супергидрофобной части поверхности.

3. На бифильных поверхностях с комбинацией гидрофильных и супергидрофильных свойств режимы испарения капель теплоносителя их последовательность подобны аналогичным характеристикам на полированных гидрофильных поверхностях металлов. Комбинация гидрофильных и супергидрофильных свойств на бифильных поверхностях в сравнении с полированными поверхностями металлов значительно влияет на длительность режимов испарения. На бифильных поверхностях длительность «пиннинга» на 30 – 40 % меньше, чем на полированных, и, соответственно, продолжительность смешанного режима испарения больше.

4. Управлять режимами испарения капель, с высокой точностью контролировать контактный диаметр капли в режиме испарения «пиннинга» можно путем формирования с заданными размерами концентрических супергидрофильных колец на супергидрофобной теплопередающей поверхности.

5. Уменьшить интенсивность шлакования конвективных и полурадиационных стальных поверхностей и, следовательно, интенсифицировать

теплообмен в энергогенерирующем оборудовании можно путем формирования лазерным излучением развитой многоуровневой текстуры «Анизотропная» или «Микроканалы» (с шириной микроканалов 90 мкм, расстоянием между осями микроканалов 180 мкм). В результате формирования таких текстур создаются условия смещения температур формирования шлака в область более высоких значений (выше до 75 °С по сравнению с поверхностью стали обработанной абразивными материалами).

6. Повысить надежность энергогенерирующего оборудования можно путем уменьшения толщины формирующегося шлака на поверхностях нагрева. Установлено, что текстура «Анизотропная» способствует уменьшению размера фронта растекания шлака, а также позволяет более эффективно проводить процедуру очистки (удаление сжатым воздухом разрушенного приповерхностного слоя со шлаком). Также установлено, что от вида и характеристик текстуры поверхностей стали 20Х23Н18, нагретой до температур 1300–1400 °С зависят характеристики фронтов растекания шлака. На поверхностях, обработанных абразивными материалами, условно можно выделить три фронта растекания. На поверхностях, модифицированных лазерным излучением наносекундой длительности с текстурой в виде микроканалов, условно можно выделить два фронта растекания. На «Анизотропной» текстуре зарегистрирован один фронт растекания.

7. По результатам натурных испытаний установлено, что поверхности с текстурой «Анизотропная» продемонстрировали худший результат по сопротивлению к загрязнениям рыхлыми отложениями (золой), наилучший результат продемонстрировали поверхности с текстурой «Микроканалы № 2». Но после очистки поверхностей воздухом давлением 10 атм. в течение 2 минут, наихудший результат по прочности адгезионного контакта железистых и сульфатно-кальциевых отложений продемонстрировала поверхность стали, обработанная абразивными материалами. Пониженной прочностью адгезионного контакта железистых и сульфатно-кальциевых отложений с поверхностью, характеризуется сталь с текстурой «Микроканалы № 2». Последнее также доказано результатами исследований методами сканирующей микроскопии и рентгенофлуоресцентного спектрального анализа. Результаты

последнего свидетельствуют, что наибольший вклад в снижение прочности адгезионного контакта продуктов горения углеводородных топлив с поверхностью вносят оксиды металлов, формирующиеся на поверхностях стали при лазерной модификации в воздушной среде.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Xia, Y. Surface effects on Sub-cooled pool boiling for smooth and laser-ablated silicon surfaces / Y. Xia, X. Gao, R. Li // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – Vol. 194. – P. 123113.
2. Zhang, Z. A review of the state-of-the-art in electronic cooling / Z. Zhang, X. Wang, Y. Yan // *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. – 2021. – Vol. 1. – P. 100009.
3. Liang, G. Review of spray cooling – Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux / G. Liang, I. Mudawar // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 115. – P. 1174–1205.
4. Yin, J. Spray Cooling as a High-Efficient Thermal Management Solution: A Review / J. Yin, S. Wang, X. Sang, Z. Zhou, B. Chen, P. Thrassos, A. Romeos, A. Giannadakis // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, № 22. – P. 1–29.
5. Gao, X. Spray Impingement Cooling: The State of the Art / X. Gao, R. Li // *Advanced Cooling Technologies and Applications*. – 2018.
6. Chakraborty, S. Analysis and feasibility of an evaporative cooling system with diffusion-based sessile droplet evaporation for cooling microprocessors / S. Chakraborty, M.A. Rosen, B.D. MacDonald // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 125. – P. 104–110.
7. Cheng, H.C. Experimental investigation of inner bubble dynamics during water droplet evaporation from heated surfaces with different roughness and wettability levels / H.C. Cheng, T.L. Chang, P.H. Chen // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 157. – P. 119980.
8. Wenzel, R.N. Resistance of solid surfaces to wetting by water / R.N. Wenzel // *Industrial and Engineering Chemistry*. – 1936. – Vol. 28, № 8. – P. 988–994.
9. Cassie, A.B.D. Wettability of porous surfaces / A.B.D. Cassie, S. Baxter // *Transactions of the Faraday Society*. – 1944. – Vol. 40, № 0. – P. 546–551.
10. Chen, X. Exploiting Microscale Roughness on Hierarchical Superhydrophobic Copper Surfaces for Enhanced Dropwise Condensation / X. Chen, J.A.

Weibel, S. V. Garimella // *Advanced Materials Interfaces*. – 2015. – Vol. 2, № 3. – P. 2–7.

11. Chen, X. Activating the microscale edge effect in a hierarchical surface for frosting suppression and defrosting promotion / X. Chen, R. Ma, H. Zhou, X. Zhou, L. Che, S. Yao, Z. Wang // *Scientific Reports*. – 2013. – Vol. 3. – P. 1–8.

12. Fong, R.W.L. Correlation between the critical heat flux and the fractal surface roughness of zirconium alloy tubes / R.W.L. Fong, G.A. McRAE, C.E. Coleman, T. Nitheanandan, D.B. Sanderson // *Journal of Enhanced Heat Transfer*. – 2001. – Vol. 8, № 2. – P. 137–146.

13. Chandramohan, A. Marangoni Convection in Evaporating Organic Liquid Droplets on a Nonwetting Substrate / A. Chandramohan, S. Dash, J.A. Weibel, X. Chen, S. V. Garimella // *Langmuir*. – 2016. – Vol. 32, № 19. – P. 4729–4735.

14. Može, M. Pattern geometry optimization on superbiphilic aluminum surfaces for enhanced pool boiling heat transfer / M. Može, M. Zupančič, I. Golobič // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 161.

15. Chinnov, E.A. Boiling Heat Transfer Enhancement on Biphilic Surfaces / E.A. Chinnov, S.Y. Khmel, V.Y. Vladimirov, A.I. Safonov, V. V. Semionov, K.A. Emelyanenko, A.M. Emelyanenko, L.B. Boinovich // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, № 19. – P. 1–19.

16. Allred, T.P. The petal effect of parahydrophobic surfaces offers low receding contact angles that promote effective boiling / T.P. Allred, J.A. Weibel, S. V. Garimella // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – Vol. 135. – P. 403–412.

17. Cheng, H.C. Effects of difference in wettability level of biphilic patterns on copper tubes in pool boiling heat transfer / H.C. Cheng, Z.X. Jiang, T.L. Chang, P.H. Chen // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2021. – Vol. 120, № July 2020. – P. 110241.

18. Zupančič, M. Pool boiling experiments on laser-made biphilic surfaces based on polydimethylsiloxane-silica films / *ENGINEERING - DEVELOPMENT AND INNOVATIONS FOR NEW EMPLOYMENTS 2014*. – 2014. – № October. – P. 225.

19. Starinskaya, E. Evaporation Dynamics of Sessile and Suspended Almost-

Spherical Droplets from a Biphilic Surface / E. Starinskaya, N. Miskiv, V. Terekhov, A. Safonov, Y. Li, M.K. Lei, S. Starinskiy // *Water (Switzerland)*. – 2023. – Vol. 15, № 2.

20. Xia, Y. Influence of Surface Wettability on Bubble Formation and Motion / Y. Xia, X. Gao, R. Li // *Langmuir*. – 2021. – Vol. 37, № 49. – P. 14483–14490.

21. Mandsberg, N.K. Generation of micro-droplet arrays by dip-coating of biphilic surfaces; The dependence of entrained droplet volume on withdrawal velocity / N.K. Mandsberg, O. Hansen, R. Taboryski // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7, № 1. – P. 1–9.

22. Pontes, P. Experimental description of bubble dynamics and heat transfer processes occurring on the pool boiling of water on biphilic surfaces / P. Pontes, R. Cautela, E. Teodori, A.S. Moita, A.L.N. Moreira // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – Vol. 178. – P. 115507.

23. Han, T. Evaporation-crystallization method to promote coalescence-induced jumping on superhydrophobic surfaces / T. Han, Y. Choi, J.T. Kwon, M.H. Kim, H.J. Jo // *Langmuir*. – 2020. – Vol. 36, № 33. – P. 9843–9848.

24. Laga, E. Dynamic contact angles and contact angle hysteresis on laser-textured aluminum alloy surfaces. – 2021. – P. 020010.

25. Laga, E.Y. Influence of conditions of liquid dosing on water droplet spreading / E.Y. Laga // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – Vol. 2211, № 1. – P. 012008.

26. Zupančič, M. Evaluation of enhanced nucleate boiling performance through wall-temperature distributions on PDMS-silica coated and non-coated laser textured stainless steel surfaces / M. Zupančič, M. Može, P. Gregorčič, A. Sitar, I. Golobič // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 111. – P. 419–428.

27. International Energy Institute (IEI). Statistical Review of World Energy 2023 / International Energy Institute (IEI) // . – 2024. – P. 76.

28. Chedid, J.P. Impacts of the Russia-Ukraine conflict on the world energy supply / J.P. Chedid, R. Penteado // *Brazilian Journal of Development*. – 2022. – Vol. 8, № 12. – P. 79067–79082.

29. Medzhidova, D. Return of Coal: A Short Visit or a Long Stay? /

D. Medzhidova // BRICS Journal of Economics. – 2022. – Vol. 3, № 4. – P. 209–229.

30. Derentz, L. The 2023 Global Energy Agenda. – 2023.

31. Harding, N.S. Ash deposition impacts in the power industry / N.S. Harding, D.C. O'Connor // Fuel Processing Technology. – 2007. – Vol. 88, № 11–12. – P. 1082–1093.

32. Benson, S.A. Ash Formation, Deposition, Corrosion, and Erosion in Conventional Boilers / Applications of Advanced Technology to Ash-Related Problems in Boilers. – 1996. – P. 1–15.

33. Kaniowski, W. Investigation of biomass, RDF and coal ash-related problems: Impact on metallic heat exchanger surfaces of boilers / W. Kaniowski, J. Taler, X. Wang, I. Kalembe-Rec, M. Gajek, A. Mlonka-Mędrala, D. Nowak-Woźny, A. Magdziarz // Fuel. – 2022. – Vol. 326. – P. 125122.

34. Bryers, R.W. Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels / R.W. Bryers // Progress in Energy and Combustion Science. – 1996. – Vol. 22, № 1. – P. 29–120.

35. Zhang, L. Co-Firing Zhundong Coal with Its Gangue: Combustion Performance, Sodium Retention and Ash Fusion Behaviors / L. Zhang, J. Yan, Q. Yang, Z. Lei, Z. Lei, Z. Li, S. Ren, Z. Wang, H. Shui // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, № 24.

36. Zhang, J. Study on Slagging Characteristics of Co-Combustion of Meager Coal and Spent Cathode Carbon Block / J. Zhang, Z. Liu, X. Li, B. Wang, Z. Teng, K. Han // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 2.

37. Borovikov, S.S. Modification of steel surfaces with aluminum oxide particles: study of wetting and spreading / S.S. Borovikov, E.Y. Laga // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2211, № 1. – P. 012011.

38. Zeng, T. Impact of adhering soil and other extraneous impurities on the combustion and emission behavior of forest residue wood chips in an automatically stoked small-scale boiler / T. Zeng, D. Kuptz, K. Schreiber, C. Schön, F. Schulmeyer, V. Zelinski, A. Pollex, H. Borchert, A. Loewen, H. Hartmann, V. Lenz, M. Nelles // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2019. – Vol. 9, № 1. – P. 99–116.

39. Weber, K. Status of waste-to-energy in Germany, Part I – Waste treatment

facilities / K. Weber, P. Quicker, J. Hanewinkel, S. Flamme // Waste Management & Research. – 2020. – Vol. 38, № 1\suppl. – P. 23–44.

40. Ji, L. Municipal solid waste incineration in China and the issue of acidification: A review / L. Ji, S. Lu, J. Yang, C. Du, Z. Chen, A. Buekens, J. Yan // Waste Management & Research. – 2016. – Vol. 34, № 4. – P. 280–297.

41. Bilirgen, H. Slagging in PC boilers and developing mitigation strategies / H. Bilirgen // Fuel. – 2014. – Vol. 115. – P. 618–624.

42. Couch, G. Understanding slagging and fouling in pf combustion. – 1994. – 118 p.

43. Han, J. Effects of torrefaction on ash-related issues during biomass combustion and co-combustion with coal. Part 3: Ash slagging behavior / J. Han, D. Yu, J. Wu, X. Yu, F. Liu, M. Xu // Fuel. – 2023. – Vol. 339. – P. 126925.

44. Hariana. Effectiveness of different additives on slagging and fouling tendencies of blended coal / Hariana, A. Prismantoko, Prabowo, E. Hilmawan, A. Darmawan, M. Aziz // Journal of the Energy Institute. – 2023. – Vol. 107. – P. 101192.

45. Vuthaluru, H.B. Remediation of ash problems in pulverised coal-fired boilers / H.B. Vuthaluru // Fuel. – 1999. – Vol. 78, № 15.

46. Kumar, K. Role of Surface Modification Techniques to Prevent Failure of Components Subjected to the Fireside of Boilers / K. Kumar, S. Kumar, H.S. Gill // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2023. – Vol. 23, № 1. – P. 1–15.

47. Singh, A. An overview of problems and solutions for components subjected to fireside of boilers / A. Singh, V. Sharma, S. Mittal, G. Pandey, D. Mudgal, P. Gupta // International Journal of Industrial Chemistry. – 2018. – Vol. 9, № 1. – P. 1–15.

48. Feoktistov, D. V. 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. – Vol. 330, № August. – P. 125576.

49. Laga, E.Y. Experimental determination of the three-phase contact line speed over textured brass surface. – 2021. – P. 040015.

50. Kleinhans, U. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior / *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2018. – Vol. 68.

51. Suman, A. Experimental analysis of micro-sized particles time-wise adhesion: the influence of impact velocity and surface roughness / A. Suman, A. Vulpio, A. Fortini, E. Fabbri, N. Casari, M. Merlin, M. Pinelli // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2021. – Vol. 165.

52. QI, Z. Roughness-dependent wetting and surface tension of molten lead on alumina / Z. QI, L. LIAO, R. WANG, Y. ZHANG, Z. YUAN // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2021. – Vol. 31, № 8. – P. 2511–2521.

53. Purushothaman, J. Influence of surface roughness and melt superheat on HDA process to form a tritium permeation barrier on RAFM steel / J. Purushothaman, R. Ramaseshan, S.K. Albert, R. Rajendran, N. Gowrishankar, V. Ramasubbu, S. Murugesan, A. Dasgupta, T. Jayakumar // *Fusion Engineering and Design*. – 2015. – Vol. 101. – P. 154–164.

54. Ali, K. An investigation of the influence of surface roughness, water quality and nozzle on spray cooling of Aluminum alloy 6082 / K. Ali, R. Amna, M. Usman Rashid, M.I. Malik, K. Kim // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2019. – Vol. 10. – P. 280–286.

55. Kim, J. Spray cooling heat transfer: The state of the art / J. Kim // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2007. – Vol. 28, № 4. – P. 753–767.

56. Cai, C. Review of the dynamic Leidenfrost point temperature for droplet impact on a heated solid surface / C. Cai, I. Mudawar // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 217. – P. 124639.

57. Feoktistov, D.V. Increasing the energy efficiency of cooling systems for energy-saturated equipment by shifting the second kind heat transfer crisis to the higher temperature region / D.V. Feoktistov, G.V. Kuznetsov, A. Abedtazehabadi, E.G. Orlova, S.P. Bondarchuk, A.V. Dorozhkin // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. – 2023. – Vol. 334, № 4. – P. 72–88.

58. Gatapova, E.Y. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with

controlled wettability / E.Y. Gatapova, A.A. Semenov, D. V. Zaitsev, O.A. Kabov // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2014. – Vol. 441. – P. 776–785.

59. Feoktistov, D.V. Biphilic heat exchange surfaces for drip irrigation cooling systems / D.V. Feoktistov, A. Abedtazehabadi, A.V. Dorozhkin, E.Y. Laga, A.O. Pleshko, E.G. Orlova // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2024. – Vol. 224. – P. 125316.

60. Yang, Z. Insights into the wettability transition of nanosecond laser ablated surface under ambient air exposure / Z. Yang, X. Liu, Y. Tian // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2019. – Vol. 533. – P. 268–277.

61. Boinovich, L.B. Synergistic effect of superhydrophobicity and oxidized layers on corrosion resistance of aluminum alloy surface textured by nanosecond laser treatment / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, A.D. Modestov, A.G. Domantovsky, K.A. Emelyanenko // *ACS Applied Materials and Interfaces*. – 2015. – Vol. 7, № 34. – P. 19500–19508.

62. Laga, E.Y. Study of wetting of aluminum surface textured by nanosecond laser processing. – 2021. – P. 020009.

63. Feoktistov, D.V. 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*. – 2020. – P. 127765.

64. Liu, W. Wettability transition modes of aluminum surfaces with various micro/nanostructures produced by a femtosecond laser / W. Liu, M. Cai, X. Luo, C. Chen, R. Pan, H. Zhang, M. Zhong // *Journal of Laser Applications*. – 2019. – Vol. 31, № 2. – P. 022503.

65. Boinovich, L.B. Comment on “Nanosecond laser textured superhydrophobic metallic surfaces and their chemical sensing applications” by Duong V. Ta, Andrew Dunn, Thomas J. Wasley, Robert W. Kay, Jonathan Stringer, Patrick J. Smith, Colm Connaughton, Jonathan D. Shephard (Ap / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, K.A. Emelyanenko, A.G. Domantovsky, A.A. Shiryaev // *Applied Surface Science*. – 2016. – Vol. 379. – P. 111–113.

66. Feoktistov, D. V. 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. – Vol. 421, № P2. – P. 127765.
67. Feoktistov, D. V. 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. – Vol. 435, № February. – P. 128263.
68. Hoorfar, M. Recent progress in Axisymmetric Drop Shape Analysis (ADSA) / M. Hoorfar, A. W. Neumann // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2006. – Vol. 121, № 1–3. – P. 25–49.
69. Misyura, S.Y. Convection in the liquid at droplet squeezing out of the capillary / S.Y. Misyura, P.A. Strizhak, R.S. Volkov, V.S. Morozov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 200. – P. 123524.
70. Strizhak, P. Convection velocities in gas and liquid phases during fragmentation of droplets / P. Strizhak, R. Volkov, O. Moussa, D. Tarlet, J. Bellettre // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2021. – Vol. 129. – P. 110476.
71. Samanta, A. Roles of chemistry modification for laser textured metal alloys to achieve extreme surface wetting behaviors / A. Samanta, Q. Wang, S.K. Shaw, H. Ding // *Materials and Design*. – 2020. – Vol. 192. – P. 108744.
72. Kuznetsov, G.V. Unification of the textures formed on aluminum after laser treatment / G.V. Kuznetsov, D.V. Feoktistov, E.G. Orlova, K. Batishcheva, S.S. Ilenok // *Applied Surface Science*. – 2019. – Vol. 469.
73. Ajaev, V.S. Levitation and Self-Organization of Droplets / V.S. Ajaev, O.A. Kabov // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2021. – Vol. 53, № 14. – P. 203–225.
74. Zaitsev, D. Dynamics of liquid film rupture under local heating / D. Zaitsev, D. Kochkin, O. Kabov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – Vol. 184. – P. 122376.
75. Picknett, R.G. The evaporation of sessile or pendant drops in still air / R.G. Picknett, R. Bexon // *Journal of Colloid And Interface Science*. – 1977. – Vol. 61, № 2. – P. 336–350.

76. Kuznetsov, G.V. Regimes of water droplet evaporation on copper substrates / G.V. Kuznetsov, D.V. Feoktistov, E.G. Orlova, K.A. Batishcheva // Colloid Journal. – 2016. – Vol. 78, № 3.
77. Chien, L.H. A study of spray-impingement cooling on smooth and pin-finned surfaces using FC-72 / L.H. Chien, T.L. Wu, S.C. Lee // Journal of Enhanced Heat Transfer. – 2011. – Vol. 18, № 5. – P. 375–387.
78. Emelyanenko, A.M. Spreading of biologically relevant liquids over the laser textured surfaces / A.M. Emelyanenko, L.B. Boinovich, K.A. Emelyanenko // Journal of Colloid and Interface Science. – 2020. – Vol. 567. – P. 224–234.
79. Stephan, P. Advanced Capillary Structures for High Performance Heat Pipes / P. Stephan, C. Brandt // Heat Transfer Engineering. – 2004. – Vol. 25, № 3. – P. 78–85.
80. Ma, Q. Droplet boiling on heated surfaces with various wettabilities / Q. Ma, X. Wu, T. Li, F. Chu // Applied Thermal Engineering. – 2020. – Vol. 167. – P. 114703.
81. Lu, G. Nucleate boiling inside small evaporating droplets: An experimental and numerical study / G. Lu, X.D. Wang, W.M. Yan // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 108. – P. 2253–2261.
82. Vinogradova, O.I. Submicrocavity Structure of Water between Hydrophobic and Hydrophilic Walls as Revealed by Optical Cavitation / Journal of Colloid And Interface Science. – 1995. – Vol. 173, № 2. – P. 443–447.
83. Wang, C.H. On the gas entrapment and nucleation site density during pool boiling of saturated water / C.H. Wang, V.K. Dhir // Journal of Heat Transfer. – 1993. – Vol. 115, № 3. – P. 670–679.
84. Kumar Saha, S. Thermofluid Dynamics of Boiling in Microchannels / S. Kumar Saha, G. Piero Celata, S.G. Kandlikar // Advances in Heat Transfer. – 2011. – Vol. 43. – P. 77–226.
85. Tam, D. Marangoni convection in droplets on superhydrophobic surfaces / D. Tam, V. von Arnim, G.H. McKinley, A.E. Hosoi // Journal of Fluid Mechanics. – 2009. – Vol. 624. – P. 101–123.
86. Vershinina, K. Laser modification of heating surfaces: A new approach to reduce boiler slagging / K. Vershinina, E. Orlova, A. Abedtazehabadi, E. Laga,

M. Rudmin, D. Feoktistov // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2024. – Vol. 182. – P. 481–496.

87. Moza, A.K. Studies on slag deposit formation in pulverized coal combustors. 1. Results on the wetting and adherence of synthetic coal ash drops on steel / A.K. Moza, L.G. Austin // *Fuel*. – 1981. – Vol. 60, № 11. – P. 1057–1064.

88. Kuznetsov, G. V. Influence of roughness on polar and dispersed components of surface free energy and wettability properties of copper and steel surfaces / G. V. Kuznetsov, A.G. Islamova, E.G. Orlova, A.S. Ivashutenko, I.I. Shanenkov, I.Y. Zikov, D. V. Feoktistov // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 422, № July. – P. 127518.

89. Laga, E.Y. Changes in the texture and wettability of brass surfaces after single and multiple pass of a nanosecond laser pulse. – 2021. – P. 040014.

90. Feoktistov, D. V. 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. – Vol. 233. – P. 107291.

91. Glushkov, D.O. Conditions and characteristics of droplets breakup for industrial waste-derived fuel suspensions ignited in high-temperature air / D.O. Glushkov, D.V. Feoktistov, G.V. Kuznetsov, K.A. Batishcheva, T. Kudelova, K.K. Paushkina // *Fuel*. – 2020. – Vol. 265.

92. Kim, R.G. Intrinsic reaction kinetics of coal char combustion by direct measurement of ignition temperature / R.G. Kim, C.H. Jeon // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Vol. 63, № 2. – P. 565–576.

93. Setyawan, H.Y. Ignition and combustion characteristics of single droplets of a crude glycerol in comparison with pure glycerol, petroleum diesel, biodiesel and ethanol / H.Y. Setyawan, M. Zhu, Z. Zhang, D. Zhang // *Energy*. – 2016. – Vol. 113. – P. 153–159.

94. Rabinovich, S.G. Measurement errors and uncertainties: Theory and practice / *Measurement Errors and Uncertainties: Theory and Practice*. – Springer New York, 2005. – 1–308 p.

95. Foadi, F. Roughness dependent wettability of sputtered copper thin films: The effect of the local surface slope / F. Foadi, G.H. Ten Brink, M.R. Mohammadizadeh, G. Palasantzas // *Journal of Applied Physics*. – 2019. – Vol. 125, № 24. – P. 244307.
96. Pilot, R. A Review on Surface-Enhanced Raman Scattering / R. Pilot, R. Signorini, C. Durante, L. Orian, M. Bhamidipati, L. Fabris // *Biosensors*. – 2019. – Vol. 9, № 2.
97. Fan, C. Effect of Mn on Microstructure and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel Surfacing Layer / C. Fan, Y. Bao, Z. Wang, L. Guo, Q. Song, N. Xu, K. Yang, Y. Jiang // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2023.
98. Mao, L.Y. Hydrogen embrittlement behavior in interstitial Mn–N austenitic stainless steel / L.Y. Mao, Z.A. Luo, C. Huang, X.M. Zhang // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2022. – Vol. 47, № 86. – P. 36716–36732.
99. Lee, S. In Situ Scanning Electron Microscopy Analysis of the Interfacial Failure of Oxide Scales on Stainless Steels and Its Effect on Sticking during Hot Rolling / S. Lee, S.R. Kim, R.E. Triambulo, C.J. Lim, H.J. Kim, J.Y. Suh, H.G. Kang, J.W. Park // *ACS Omega*. – 2022. – Vol. 7, № 17. – P. 15174–15185.
100. Zhang, H. Effect of Ni content on stainless steel fabricated by laser melting deposition / H. Zhang, C.H. Zhang, Q. Wang, C.L. Wu, S. Zhang, J. Chen, A.O. Abdullah // *Optics and Laser Technology*. – 2018. – Vol. 101. – P. 363–371.
101. Frenkel, Y.I. Kinetic theory of liquids. – Moscow: Ripol Classic, 1975. – 592 p.
102. Feoktistov, D.V. A new approach to reducing slagging based on laser modification of heating surfaces: Field tests and mathematical modeling / D.V. Feoktistov, D.O. Glushkov, K.K. Paushkina, E.G. Orlova, E.Y. Laga, A.V. Zhuikov, K.Y. Vershinina // *Fuel*. – 2025. – Vol. 382. – P. 133778.
103. Alekhnovich, A.A. Current research on the slagging properties of coals and slagging in boilers / A.A. Alekhnovich // *Power Technology and Engineering*. – 2012. – Vol. 45, № 6. – P. 441–446.
104. Zhuikov, A. V. Combustion of Coal with Forest Biomass in Nonisothermal Heating / A. V. Zhuikov, D.O. Glushkov // *Coke and Chemistry*. – 2022. – Vol. 65, № 8.

– P. 308–315.

105. Alekhnovich, A.N. Slagging properties of coals and allowance for them in the analysis of the possibility of using out-of-design fuel / A.N. Alekhnovich, N. V. Artem'eva, V. V. Bogomolov // *Power Technology and Engineering*. – 2006. – Vol. 40, № 3. – P. 170–174.

106. Chernetskii, M.Y. Studying the Slagging Properties of Mechanically Activated Coals / M.Y. Chernetskii, E.B. Butakov // *Thermal Engineering*. – 2022. – № 2. – P. 42–47.

107. Bala-Litwiniak, A. Computational and experimental study of pine and sunflower husk pellet combustion and co-combustion with oats in domestic boiler / A. Bala-Litwiniak, M. Zajemska // *Renewable Energy*. – 2020. – Vol. 162. – P. 151–159.

108. Kupka, T. Investigation of ash deposit formation during co-firing of coal with sewage sludge, saw-dust and refuse derived fuel / T. Kupka, M. Mancini, M. Irmer, R. Weber // *Fuel*. – 2008. – Vol. 87, № 12. – P. 2824–2837.

109. Ma, X. Effect of nanosecond pulsed laser parameters on the color making of 304 stainless steel / X. Ma, X. Nie, J. Zhao, P. Shrotriya, Y. Zhang, Y. Cui, J. Wang // *Optics & Laser Technology*. – 2020. – Vol. 126. – P. 106104.

110. Moskvina, L.N. Protective Oxidation of Boiler Equipment Heating Surfaces with Concurrently Removing Ash Deposits / L.N. Moskvina, A.A. Efimov, B.A. Gusev // *Thermal Engineering* 2020 67:3. – 2020. – Vol. 67, № 3. – P. 173–177.

## Приложение А

### Акт внедрения результатов диссертационной работы

TOMSK  
POLYTECHNIC  
UNIVERSITY



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по образовательной деятельности ТПУ  
М.А. Соловьев  
«15» декабря 2024г.

#### АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Лага Екатерины Юрьевны

«ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА  
ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ВСЛЕДСТВИЕ ИЗМЕНЕНИЯ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛА ПРИ  
ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы Лага Е.Ю. «Интенсификация теплообмена и фазовых превращений на теплопередающих поверхностях вследствие изменения характеристик приповерхностных слоев металла при воздействии лазерного излучения», предоставленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.4. «Теплофизика и теоретическая теплотехника», используются в учебном процессе в Исследовательской школе физики высокоэнергетических процессов Томского политехнического университета в следующих дисциплинах: «Термодинамика и теплофизика», «Моделирование современных экспериментов в физике высоких энергий», «Взаимодействие излучения с веществом», а также при выполнении НИРС и магистерских диссертаций студентами, обучающимися по направлению 03.04.02 «Физика», образовательная программа «Физика конденсированного состояния».

Директор ИШФВП

Д.О. Глушков