

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ В СИСТЕМЕ «ВРАЩАЮЩИЙСЯ ВАЛ–ТЖМТ–СТЕНКА КРОНШТЕЙНА»

Бокова Т.А., Боков П.А., Волков Н.С., Маров А.Р.
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева Нижний Новгород, Россия),

Баранова Л.В. (ФБУ «Нижегородский ЦСМ» Нижний Новгород, Россия)

Введение

Проект «Прорыв», реализуемый Госкорпорацией «Росатом», нацелен на достижение нового уровня в ядерной энергетике. Цель проекта – разработка и внедрение замкнутого ядерного топливного цикла на базе быстрых нейтронных реакторов, способствующих развитию масштабной ядерной энергетики. Одним из главных направлений проекта является разработка реакторов на быстрых нейтронах с использованием тяжелых жидкометаллических теплоносителей. Потенциальными теплоносителями являются свинец и эвтектика свинец-висмут, которые в перспективе могут применяться как в реакторах большой мощности, так и в установках малой и средней мощности для обеспечения надежного источника энергоснабжения. В России накоплен значительный опыт исследования физико-химических свойств свинца и успешного его использования в атомной энергетике [1].

Одним из ключевых вопросов является изучение взаимодействия тяжелого жидкометаллического теплоносителя с поверхностями конструкционных материалов в пристенном слое. Этот процесс может оказывать влияние на коррозионно-эрозионные, теплогидравлические, триботехнические и другие эксплуатационные характеристики циркуляционных стендовых и реакторных контуров [2]. В связи с этим исследования физико-химических и трибологических свойств пристенного слоя тяжелых жидкометаллических теплоносителей представляют собой актуальную задачу.

Важным элементом ядерной энергетической установки является главный циркуляционный насос и соответствующее оборудование. Предыдущие исследования показали, что трибологические характеристики контактной зоны, где происходит взаимодействие свинца в циркуляционных контурах, существенно влияют на работоспособность контактных пар (например, элементы проточной части насоса или гидростатические подшипники, функционирующие в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей) [3]. На данный момент не существует литературных данных о влиянии пристенного слоя на конструкционные материалы в системе вал–жидкометаллический теплоноситель. Исследования трибологических свойств свинцового и свинцово-висмутного теплоносителей проводятся в НГТУ им. Р.Е. Алексеева. До настоящего времени были получены и опубликованы результаты экспериментальных исследований пристенного слоя в виде стенки конструкционного материала – свинцовый теплоноситель [1], исследования характеристик трения при продольном возвратно-поступательном перемещении образцов в среде ТЖМТ [4], исследования по определению потерь мощности при трении расплава свинца о вал насоса и геометрии его свободной поверхности при вращательном движении [5], триботехнические характеристики зон контакта в среде теплоносителей ядерных реакторов на быстрых нейтронах АЭС [5, 6, 7, 8].

В представленных работах подробно описаны методики проведения экспериментальных исследований и полученные результаты, однако информация, которая позволит столь же подробно охарактеризовать процессы, происходящие в системе вала, вращающегося с большой скоростью, отсутствует. Доклад отражает продолжение работ по приведенному направлению исследований состояния пристенной области в кольцевом зазоре в системе «вращающийся вал–ТЖМТ–стенка кронштейна»

экспериментального участка статического стенда со свинцовым теплоносителем при температуре до 500 °С.

1. Материалы и методика исследований

В лаборатории «Реакторная гидродинамика» на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева были проведены экспериментальные исследования. Для этого был изготовлен и смонтирован экспериментальный стенд ЭТС-2018 (рис. 1), который включает в себя ряд основных элементов, таких как экспериментальный стенд с экспериментальной моделью вала насоса и гильзой, имитирующей стенку кронштейна ГЦН, съемные нагревательные элементы, плавбак (бак дренажный), трубопроводы и арматура систем очистки, заполнения и дренажа свинцового теплоносителя, подсистема контроля и регулирования содержания кислорода в свинцовом теплоносителе и контрольно-измерительные приборы. Все основные емкости, трубопроводы и экспериментальный участок изготовлены из высококачественной стали марки 12Х18Н10Т. Для обогрева стенда используются электрические обогревательные секции с мощностью 2 кВт

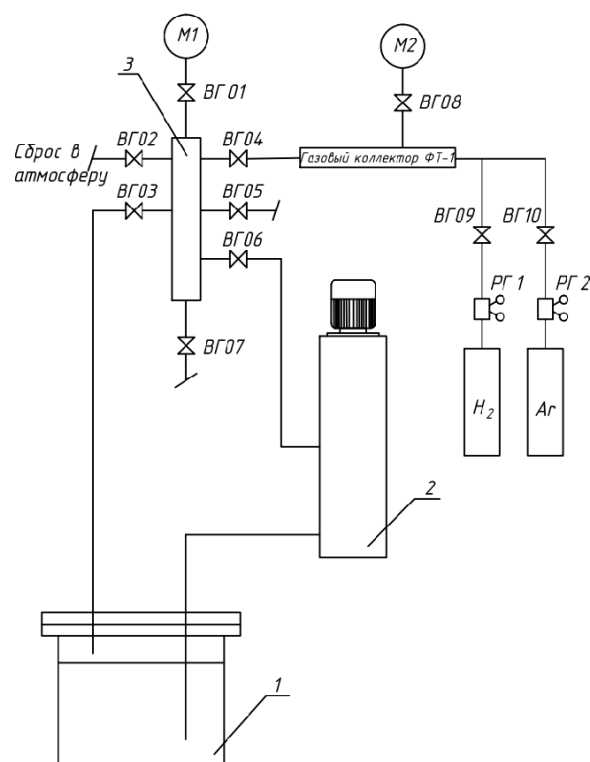


Рис. 1. Принципиальная схема стенда ЭТС-2018:

1 – бак плавильный; 2 – экспериментальный участок; 3 – коллекторы газовой системы

Экспериментальная сборка, имитирующая вращение вала циркуляционного насоса, позволяет исследовать структуру пристенного слоя при вращении вала в кольцевом зазоре между валом и гильзой, а также определить характеристики поверхности примененного конструкционного материала.

На рисунке 2 изображен общий вид экспериментальной установки.

Для получения данных о пристенном слое после 50–100 часов вращения вала в среде свинца со скоростью 700 об/мин происходит остановка электродвигателя, снимается быстросъемный кожух для обогрева гильзы, экспериментальный участок погружается в холодную воду. Затем отрезается нижний участок вала (10 см) вместе с гильзой. После чего производится трибологический анализ полученного участка на лабораторном оборудовании кафедры.

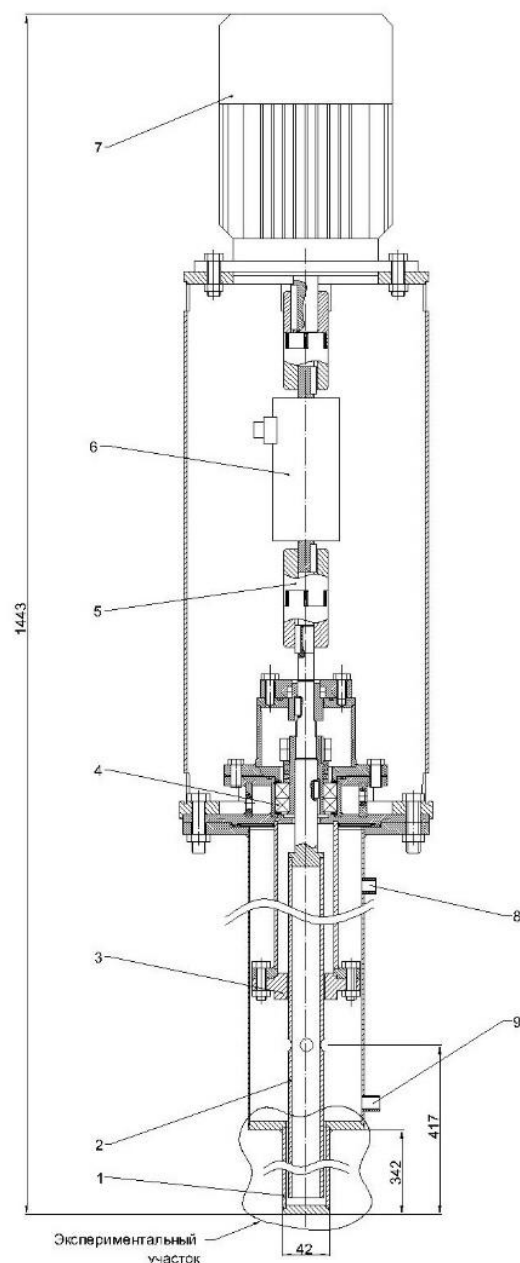


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки:

1 – гильза; 2 – вал; 3 – нижний подшипник; 4 – верхний подшипник; 5 – муфта;
7 – электродвигатель; 8 – подвод газа; 9 – подвод свинца

2. Результаты и обсуждение

Обычно в контурах с жидкометаллическим теплоносителем изучали микротвердость конструкционных материалов и покрытий на их поверхностях в пристенной области после вытекания теплоносителя из элементов или после остывания. Однако это не давало полного представления о структуре свинцового расплава и стали, поэтому в настоящем исследовании измерения проводились после быстрой заморозки образца.

На рисунках 3, 4 приведены фотографии пристенной области поперечного шлифа образца после замораживания циркулирующего расплава свинца. Видно, что примеси не налипают на стенку, а находятся в виде островков или конгломератов на поверхности стали, часто с прослойкой чистого свинца между конгломератами и стальной стенкой.



Рис. 3. Кольцевой зазор свинец-штулка при 200-кратном увеличении ($T=450^{\circ}\text{C}$, $t=50$ ч, $a=10\text{--}100$, $n=700\text{об/мин}$)

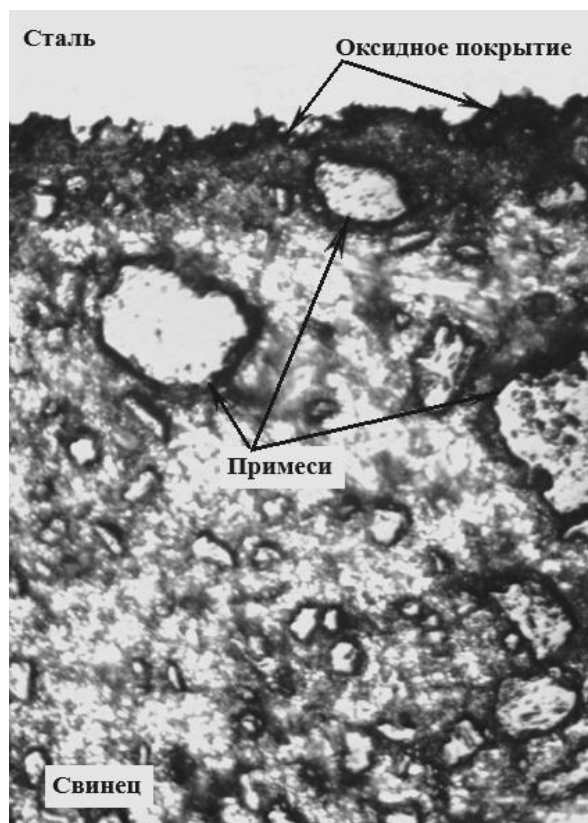


Рис. 4. Кольцевой зазор свинец-штулка при 400-кратном увеличении ($T=450^{\circ}\text{C}$, $t=100$ ч, $a=10\text{--}100$, $n=700\text{об/мин}$)

Также было выявлено, что наличие оксидного покрытия на образце, выдержанном в течение 50 часов при определенных условиях, значительно меньше, чем на образце, выдержанном в течение 100 часов, что затрудняло отделение слитков свинцового теплоносителя от материала конструкции.

Размер образований примесей в пристенной области зависит от условий и режима работы контура ТЖМТ. При циркуляции теплоносителя в условиях насыщения кислородом на некоторых участках отложения примесей достигают максимальной толщины.

В результате исследований было установлено, что в контурах ТЖМТ происходит явление несмачивания поверхности конструкционного материала теплоносителем (при 100 часах работы) и коррозионно-эрозионный износ поверхностей конструкционных материалов (сталей), что сопровождается растворением твердого металла в свинцовом растворе и переносом его атомов в жидкий раствор (при 50 часах работы).

В случае несмачивания стали свинцовым теплоносителем в области пристенного слоя согласно общим физическим представлениям, несмачивание может быть обеспечено при наличии агента – газовой или парогазовой прослойки между внешней поверхностью теплоносителя и поверхностью стали, исключающей непосредственный прямой контакт твердого и жидкого металлов до, в момент и после замораживания образца [1].

Измерение микротвердости производилось в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 «Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения» по методу восстановленного с использованием четырехгранной пирамиды с квадратным основанием (по методу Виккерса). Для измерения применялось оборудование Shimadzu HNV-2T.

**Результаты измерения микротвердости пристенной области
(при $t=50$ часов, $T=450^{\circ}\text{C}$, $\gamma=700\text{об/мин}$).**

HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6
213	201	205	207	198	208
220	228	239	220	232	227
6,64	9,1	11	8,31	11,1	9,48
6,9	8,12	8,19	8,3	8,3	8,32
6,56	9,23	8,76	8,3	8,21	8,3
6,27	8,04	7,16	8,3	8,15	8,15
7,56	8,12	7,58	8,5	8,29	7,55
8,07	7,54	10,4	9,47	8,32	8,3
8,11	9,04	9,55	10	10,3	8,89
224	204	198	218	234	259
220	198	197	213	242	218
HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6

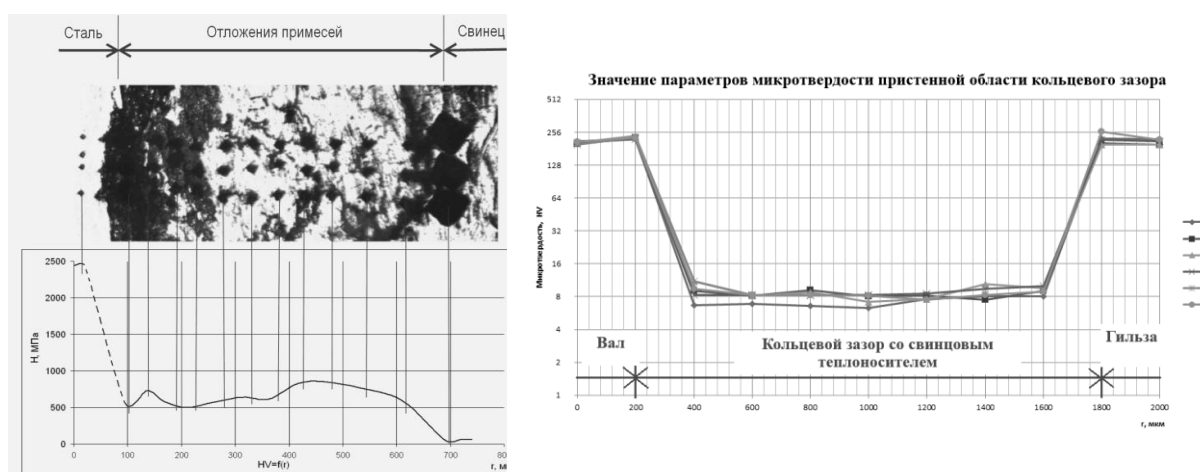
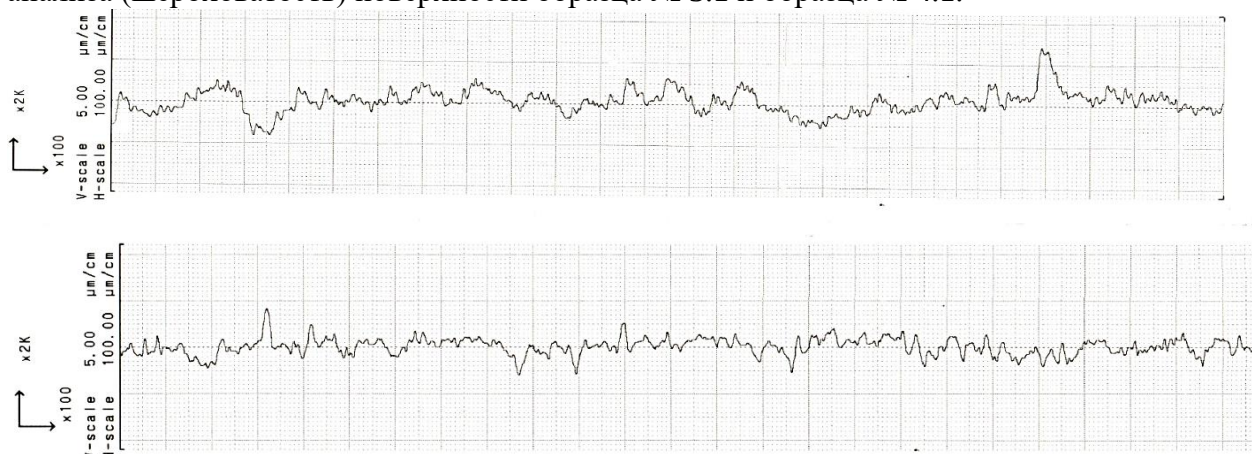


Рис. 5. Сравнение результатов измерения микротвердости пристенной области при циркуляции в трубопроводе и при вращении в кольцевом зазоре

Профилометрические исследования были проведены на портативном профилометре – Surftest SJ-410 MITUTOYO в ФБУ «Нижегородский ЦСМ» и TR220 НГТУ им. Р.Е.Алексеева. Были построены профиль поверхностей и шероховатость исследуемых образцов. На рисунке 6 представлены результаты профилометрического анализа (шероховатость) поверхности образца № 3.1 и образца № 4.1.



*Рис. 6. Профиль поверхности для поверхности образца № 3.1 (вверху) и образца № 4.1 (внизу)
(наружная стенка имитатора вала и внутренняя стенка гильзы)*

В результате проведенных измерений и анализов было установлено, что образование пристенной области, содержащей оксидное покрытие на поверхностях структурных материалов в комбинации с переносом масс примесей твердой фазы и слоями слабо сцепленных частиц внутри теплоносителя, приводит к повышенной шероховатости контактирующих поверхностей с (ТЖМТ).

Согласно результатам исследований влияния времени вращения вала в среде ТЖМТ на изменение шероховатости контактирующих поверхностей, увеличение времени работы при неизменных условиях термодинамической активности кислорода, температуры и скорости теплоносителя, направленное на формирование оксидного покрытия в пристенной области, приводит к снижению параметров Ra и Rz поверхностей структурных материалов. Предполагается, что формирование оксидного покрытия в пристенной области происходит со временем при постоянном перемешивании теплоносителя в узком кольцевом зазоре.

Повышенная шероховатость поверхностей структурных материалов, вызванная образованием пристенной области, приводит к увеличению гидравлического сопротивления контуров с ТЖМТ, что может негативно сказаться на гидродинамических характеристиках отдельных участков контуров РУ с ТЖМТ, а также на характеристиках теплообмена.

Анализ структур пристенной области показал, что на границе раздела фаз «ТЖМТ–конструкционный материал» возможно выделение следующих структур: сталь, оксидное покрытие, слой рыхлых отложений, слабо сцепленных с оксидным покрытием, газовая фаза (вследствие несмачивания теплоносителем поверхности оксида), диффузионный слой пограничного турбулентного слоя, обогащенный примесями, частицы примесей, находящиеся в потоке теплоносителя вблизи пристенной области.

Дополнительно были обнаружены отпечатки газовых (газопаровых) каверн как на поверхности контакта ТЖМТ со стенкой, так и в потоке ТЖМТ.

Заключение

Результаты проведенных экспериментов показали, что пристенная область при вращательном движении представляет собой сложную структуру, состоящую из нескольких компонентов. В ее состав входят оксидное покрытие на поверхностях сталей, отложения примесей твердой фазы, газовая прослойка, слой примесей в пограничном турбулентном слое и свободно перемещающиеся с ним. В сравнении с возвратно-поступательным движением и течением в круглой трубе, пристенная область при вращательном движении обладает более интенсивным перемешиванием примесей и созданием более однородной среды.

Экспериментально установлено, что дисперсная система пристенного слоя в контурах с ТЖМТ представляет собой дисперсную твердую фазу частиц примесей и теплоноситель, а также газовую фазу, которые ограничены поверхностью раздела. Однако при вращательном движении, дисперсная система не имеет четких границ и представляет собой перемешанную дисперсную среду.

Экспериментально подтверждено, что шероховатость поверхностей конструкционных материалов изменяется в результате вращения элементов экспериментального участка в ТЖМТ. Изменение в основном связано с наличием крепко сцепленного оксидного слоя, который является антифрикционным покрытием и может оказать влияние на работу элементов системы СУЗ, гидростатических подшипников и других пар трения в среде ТЖМТ. Полученные результаты могут быть полезны для разработчиков и проектантов энергетического оборудования для реакторных установок с ТЖМТ.

Список литературы

1. *Безносков А.В.* Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАт. 2006. – 370 с.
2. *Безносков А.В.* Экспериментальное исследование контактных пар трения в механизмах, работающих в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.И. Шумилков // Трибология – машиностроению, труды XI Международной научно-технической конференции. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова. 2016 Издательство: Институт компьютерных исследований с.11–12
3. *Безносков А.В.* Экспериментальное исследование контактных пар трения в механизмах, работающих в ТЖМТ / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.И. Шумилков, Д.С. Забоева // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы 2016, № 4 с. 53–63
4. *Баранова Л.В.* Исследование структуры пристенного слоя при движении свинцового теплоносителя в кольцевом зазоре / Л.В. Баранова, А.Н. Белов, В.А. Гадетов, Р.А. Коротаев // XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки) материалы докладов. 2018 Издательство: Нижегородский государственный инженерно-экономический институт (Княгинино) 2018, с.117–121
5. *Безносков А.В.* Экспериментальные исследования по определению потерь мощности при трении расплава свинца о вал насоса, и геометрии его свободной поверхности при вращательном движении / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, Н.С. Лукичев, В.А. Гадетов, А.Г. Мелузов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева 2018, № 1(120) с.81–90
6. *Безносков А.В.* Исследование структуры пристенного слоя при движении свинцового теплоносителя в кольцевом зазоре / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков, Н.В. Серов // ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ОТ ИССЛЕДОВАНИЙ К ВНЕДРЕНИЮ – 2019. Сборник материалов научно-практической конференции. 2019. Издательство: НГТУ им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород) 2019, с.78
7. *Безносков А.В.* Обоснование работоспособности гидростатического подшипника, в условиях реакторных контуров со свинцово-висмутовым теплоносителем при температурах 200–350°C / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.Р. Маров, Н.С. Лукичев // Будущее технической науки, сборник материалов XVIII Всероссийской молодежной научно-технической конференции. 2019 Издательство: НГТУ им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород) 2019, с.297–298
8. *Баранова Л.В.* Определение пристенного слоя ТЖМТ в системе «вал–ТЖМТ–стенка» / Л.В. Баранова, П.А. Боков, В.А. Гадетов, Ядерные технологии: от исследований к внедрению Сборник материалов научно-практической конференции. 2018 Издательство: НГТУ им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород) 2018, с. 5.