

УДК 621.039.534

Ю.Н. Дроздов<sup>1</sup>, А.В. Безносков<sup>2</sup>, Т.А. Бокова<sup>2</sup>, А.И. Шумилков<sup>2</sup>,  
К.А. Махов<sup>2</sup>, А.С. Черныш<sup>2</sup>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕНИЯ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ОБРАЗЦОВ В СРЕДЕ ТЖМТ

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Представлены результаты экспериментальных работ по исследованию триботехнических характеристик трения в среде высокотемпературного свинцового теплоносителя при продольном возвратно-поступательном перемещении образцов, выполненных из стали аустенитного класса 12X18H10T. Исследования проводились при температуре 500<sup>0</sup>С, содержании кислорода в свинце на линии насыщения (термодинамической активности теплоносителя) 10<sup>0</sup>, состоянии контактных поверхностей пары - материал в состоянии поставки и со сформированными на поверхностях образцов оксидными покрытиями в среде расплава свинца, удельная нагрузка варьировалась от 0,5 до 23 кг/см<sup>2</sup>, скорость относительного перемещения образцов 0,005-0,01 м/с. Получены повторяющиеся представительные результаты зависимости коэффициента трения в среде ТЖМТ от пути перемещения исследуемых образцов.

### Введение

Наша страна располагает значительным опытом создания и эксплуатации транспортных реакторных установок со свинец-висмутовым теплоносителем атомных подводных лодок проектов 645, 705 и 705К, а также исследований и отработки технологий и оборудования со свинцовым теплоносителем. При проведении этих работ вопросам триботехники в элементах реакторных контуров в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей внимания практически не уделялось. Имевшие место аварийные ситуации и необходимость обеспечить ресурсную работоспособность установок при работе энергоблока АЭС с установками БРЕСТ И СВБР не с моделью эксплуатации АПЛ, а с работой в течение нескольких десятилетий на номинальной мощности, инициировали проведение исследований и создание новой области трибологии – трибологии в среде высокотемпературных свинцового и свинец-висмутового теплоносителей инновационных реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых этими теплоносителями.

Основными элементами рассматриваемых реакторных контуров, содержащих контактные пары трения в среде расплавов свинца и эвтектики свинец-висмут (объектами трибологии), являются следующие:

- главные циркуляционные насосы, наиболее ответственные элементы которых подшипники скольжения, работающие в среде высокотемпературных жидких металлов при высоких скоростях и нагрузках;
- элементы системы управления и защиты реакторов;
- стержни с нейтропоглощающим веществом, находящимся в стальных оболочках, которая является поверхностью трения о внутреннюю поверхность чехла стержней-поглотителей в среде теплоносителя;
- элементы системы перегрузки ядерного топлива, содержащие поверхности трения в среде теплоносителя;
- трубная система парогенераторов в части поверхностей теплообменных трубок, контактирующих с дистанционирующими решетками;

- поверхности тепловыделяющих элементов, контактирующие с дистанционирующими решетками и др. Поверхности конструкционных материалов контура, контактирующие с поверхностью движущегося потока высокотемпературного жидкого металла также можно рассматривать как объект трибологии. Особенности трибологии в среде ТЖМТ следующее:
- невозможность применения традиционных смазочных сред в контакте с расплавами жидких металлов;
- высокая (400-550<sup>0</sup>С) температура контактных поверхностей;
- малая вязкость жидкометаллических теплоносителей;
- несмачиваемость рабочих поверхностей (сталей, чугунов), покрытых оксидными покрытиями теплоносителями;
- возможность интенсивного отвода тепла из зон контакта трущихся пар жидкометаллическими теплоносителями;
- концентрация в зоне контакта пар трения мелкодисперсных частиц и примесей (оксидов теплоносителей, соединений элементов конструкционных материалов – продуктов коррозионно-эрозионного износа, случайных загрязнений), образующих дисперсную систему с ярко выраженными поверхностными свойствами, отличающимися от свойств основного объема теплоносителя;
- на порядок большая плотность по сравнению с традиционными реакторными теплоносителями (натрий, вода);
- большая величина поверхностного натяжения по сравнению с традиционными теплоносителями. Для обеспечения ресурсной работоспособности проектируемого оборудования с контактными поверхностями в среде ТЖМТ для инновационных реакторов на быстрых нейтронах необходимо подтверждение работоспособности контактных поверхностей в среде ТЖМТ, исследование их триботехнических характеристик.

Для изучения влияния пристенного слоя сталь – ТЖМТ и образующегося оксидного покрытия на стали на триботехнические характеристики трущихся поверхностей (коэффициента трения и др.), при варьируемых параметрах высокотемпературного расплава свинца и эвтектики свинца-висмута. В НГТУ выполняется комплекс экспериментальных исследований.

Экспериментально исследовались зависимости влияния на трибологические характеристики (коэффициента трения и др.) контактной пары при фиксированной термодинамической активности O<sub>2</sub> (содержании активного кислорода, способного вступать в реакции окисления) в расплаве свинца и свинца-висмута при варьируемой приложенной нагрузке при возвратно-поступательном горизонтальном перемещении экспериментальных образцов конструкционных материалов в условиях, приближенных к натурным, применительно к инновационным реакторным установкам типа БРЕСТ и СВБР.

На находящиеся в контакте с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями металлических поверхностях образуются оксидные пленки в результате взаимодействия с кислородом, содержащемся в теплоносителе. Как правило, пристенный слой в среде ТЖМТ обогащен примесями: соединениями теплоносителя, компонентов конструкционных материалов и др. Образовавшиеся оксидные покрытия и пристенный слой предохраняют контактные поверхности сталей и чугунов от схватывания, связанного с ним глубинного вырывания и других негативных эффектов. Они являются важным фактором эксплуатации контактных поверхностей в реакторных условиях. Частицы оксидов теплоносителя (свинца, висмута) соединений компонентов сталей, пузырьки паров, газов и др., находящиеся в пристенных слоях поверхностей трения, пропитанные теплоносителем, оказывают эффект, аналогичный эффекту смазочного материала. Несмотря на то, что пристенный слой может быть обогащен соединениями компонентов конструкционных материалов, при трении контактной пары в этих условиях может происходить интенсивное изнашивание поверхностей контакта.

Целью экспериментального исследования являлось получение зависимости влияния

на коэффициент трения приложенной нагрузки контактной пары из оксидированных и неоксидированных образцов из стали 12Х18Н10Т, конечной целью испытаний определение триботехнических характеристик образцов конструкционных сталей в среде тяжелых жидких металлов реакторных установок.

Для достижения указанной цели решались следующие основные задачи:

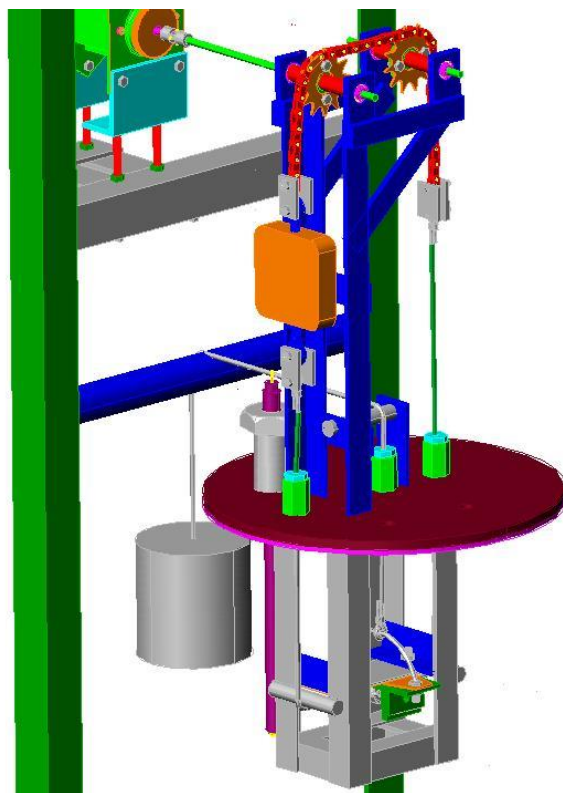
- разработка схемы и конструкций экспериментальных стендов, программ и методик испытаний;
- разработка и монтаж высокотемпературных стендов с ТЖМТ и экспериментальных участков;
- отработка основных узлов конструкции экспериментальных участков;
- проведение экспериментальных исследований;
- обработка и анализ полученных результатов, проведение необходимых расчетно-теоретических исследований.

Эксперименты проводились последовательно на двух стендах попеременно одинаковыми методиками испытаний

#### *Описание экспериментального стенда ТР-2010НГТУ*

Стенд ТР-2010НГТУ предназначен для определения коэффициента трения контактных пар трения образцов из стали в ТЖМТ при температуре около 500 °С (рис. 1).

На рис. 1 изображены основные элементы высокотемпературного стенда ТР-2010НГТУ.



**Рис. 1.** Схема экспериментального участка высокотемпературного стенда ТР–2010НГТУ

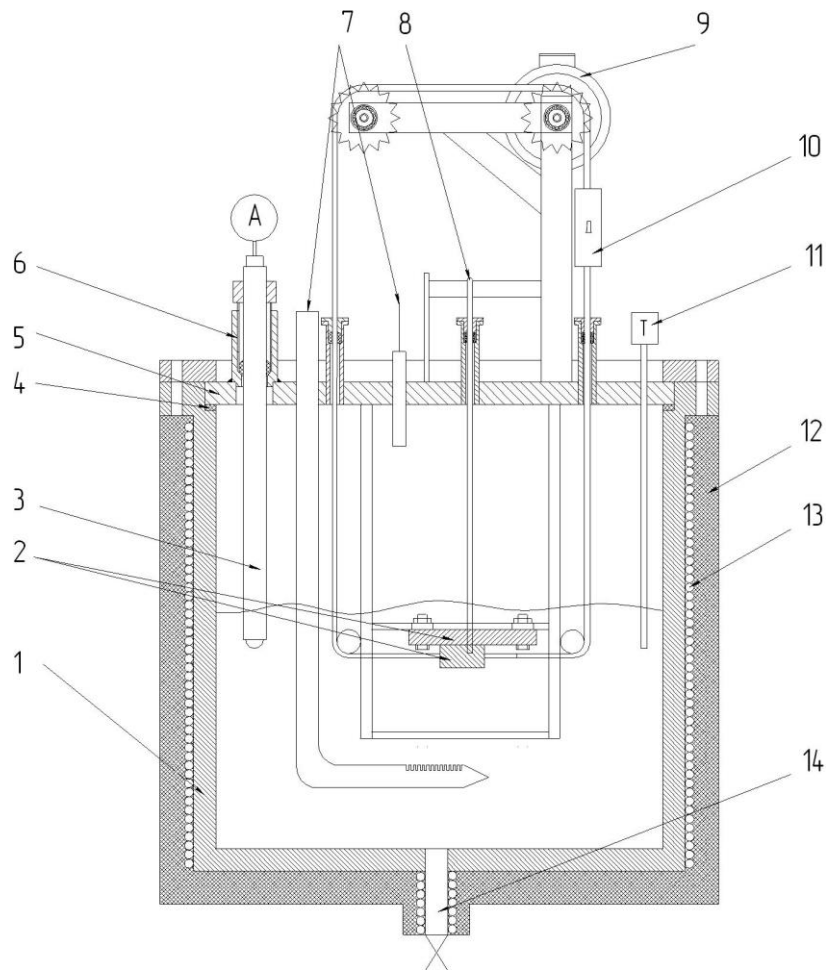
В состав стенда ТР-2010НГТУ входят следующие элементы (рис. 2).

- емкость с ТЖМТ;
- система управления оборудованием и регулирования параметров стенда;
- система электроснабжения потребителей стенда;
- система защитного газа

Емкость заполнена расплавом тяжелого жидкометаллического теплоносителя. Обогрев

емкости осуществляется электрическим током нихромовыми электроспиралью. Снаружи емкость покрыта теплоизоляцией. В емкости на подвесной площадке размещен образец № 1. Образец №2 находится под ним и прижимается к нему в результате действия выталкивающей силы Архимеда и устройства, обеспечивающего необходимую силу нагружения экспериментального участка. Удельная нагрузка на контактную пару трения варьировалась в диапазоне от 0,5 до 2,5 кг/см<sup>2</sup> с помощью двух грузов массой 5 кг и 12,7 кг. При грузе в 5 кг удельная нагрузка изменялась от 0,5 кг/см<sup>2</sup> в начале участка до 1,2 кг/см<sup>2</sup> в конце экспериментального участка, при грузе 12,7 кг удельная нагрузка изменялась от 1 кг/см<sup>2</sup> в начале участка до 2,5 кг/см<sup>2</sup> в конце.

Перемещение образца №2 относительно образца №1 осуществляется посредством приводимой в движение двигателем системы блоков с тросами. Контактная пара трения погружена в свинцовый (свинец-висмутовый) теплоноситель.



**Рис. 2. Конструктивная схема стенда ТР-2010НГТУ:**

1 – емкость; 2 – контактная пара трения; 3 – ДАК; 4 – прокладка; 5 – крышка; 6 – узел уплотнения ДАК; 7 – трубка подвода и отвода газа; 8 – устройство нагружения; 9 – электродвигатель; 10 – тензодатчик динамометра; 11 – погружной термопреобразователь; 12 – теплоизоляция; 13 – спираль электрообогрева; 14 – дренаж

Программа испытаний включала в себя следующее:

1. Определение силы трения, вносимой конструктивными элементами стенда. Режим «холостой ход». Исследование проводилось без образцов в среде воздуха и в среде свинцового теплоносителя при температуре 500°С, при постоянной скорости перемещения тросов 0,005 м/с и постоянной термодинамической активности O<sub>2</sub>: 10<sup>0</sup>. В данном режиме определялась сила тяги, эквивалентная силе трения, вносимой конструктивными элементами стенда при проведении испытаний с контактной парой трения.

2. Определение коэффициента трения образцов из стали 12X18H10T в состоянии поставки, в среде воздуха при постоянной скорости перемещения образцов 0.005 м/с, переменной нагрузке - удельных давлений в диапазоне от 0.5 до 2,5 кг/см<sup>2</sup>.

3. Определение коэффициента трения образцов из стали 12X18H10T в состоянии поставки, при температуре 500°С в среде свинцового (свинец-висмутного) теплоносителя при постоянной скорости перемещения образцов 0.005 м/с, постоянной термодинамической активности O<sub>2</sub>: 10<sup>0</sup> и переменной нагрузке (силе прижатия) - удельных давлений в диапазоне: от 0.5 до 2,5 кг/см<sup>2</sup>.

4. Определение коэффициента трения запассивированных в расплаве свинца образцов из стали 12X18H10T при температуре 500°С в среде свинцового (свинец-висмутного) теплоносителя при постоянной скорости перемещения образцов 0,005 м/с, постоянной термодинамической активности O<sub>2</sub>: 10<sup>0</sup> и переменной нагрузке (силе прижатия) - удельных давлений в диапазоне от 0.5 до 2,5 кг/см<sup>2</sup>. Время пассивации образцов 24 ч, условия пассивации - температура расплава свинца 450-480°С термодинамическая активность O<sub>2</sub>: 10<sup>0</sup>

5. Обобщение и анализ полученных результатов.

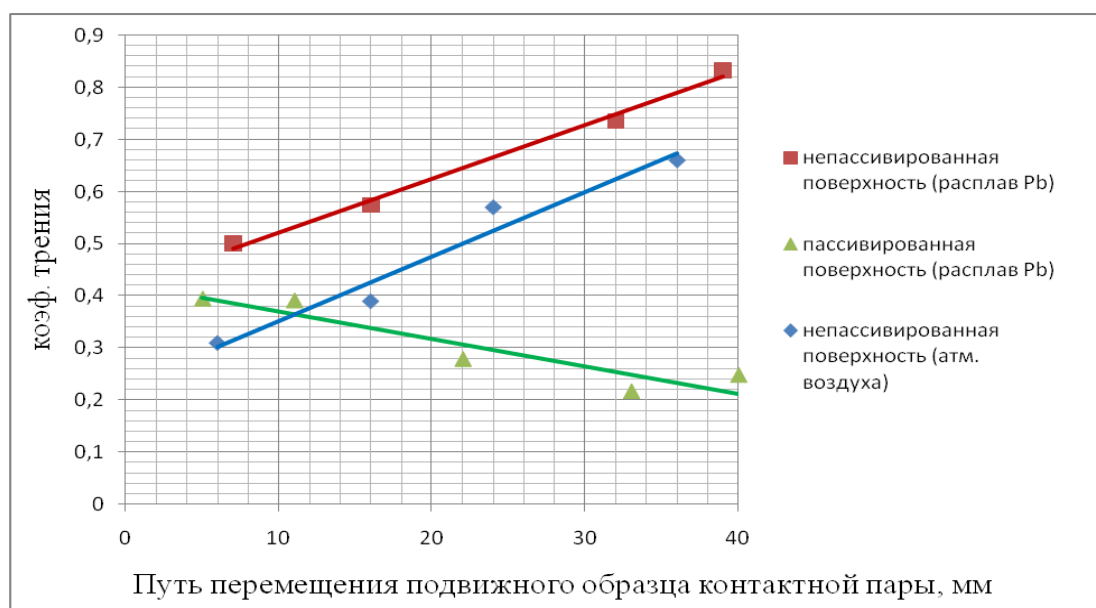
### Обсуждение результатов исследования

Результаты испытаний в среде воздуха и свинца: удельная нагрузка от 0,5 до 1.2 кг/см<sup>2</sup> и удельной нагрузкой на контактную пару трения от 1 до 2,5 кг/см<sup>2</sup>.

Условия проведения испытаний в атмосфере воздуха: рабочая среда - воздух; температура - 20° С; материал контактной пары - аустенитная сталь 12X18H10T; состояние контактных поверхностей пары - материал в состоянии поставки; масса груза – 5 кг (удельная нагрузка от 0,5 до 1,2 кг/см<sup>2</sup>); скорость относительного перемещения образцов - 0,005 м/с.

Условия проведения испытаний в среде свинца: рабочая среда - свинец; температура - 500° С; материал контактной пары - аустенитная сталь 12X18H10; состояние контактных поверхностей пары - материал в состоянии поставки, поверхности контакта оксидированы и не оксидированы защитной пленкой (PbO); скорость относительного перемещения образцов - 0,005 м/с.

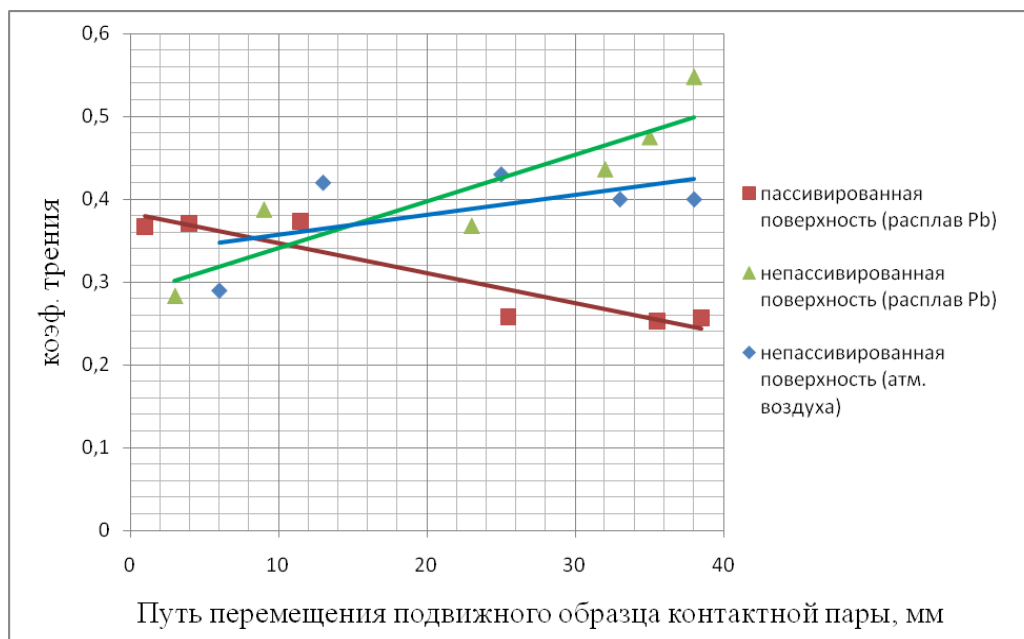
а) На рис. 3 представлены результаты проведенных исследований, полученные в ходе экспериментального исследования в диапазоне удельных нагрузок на контактную пару трения от 0.5 до 1,2 кг/см<sup>2</sup>.



**Рис. 3. Зависимость коэффициента трения по пути перемещения подвижного образца контактной пары при удельной нагрузке от 0,5 до 1,2 кг/см<sup>2</sup>**

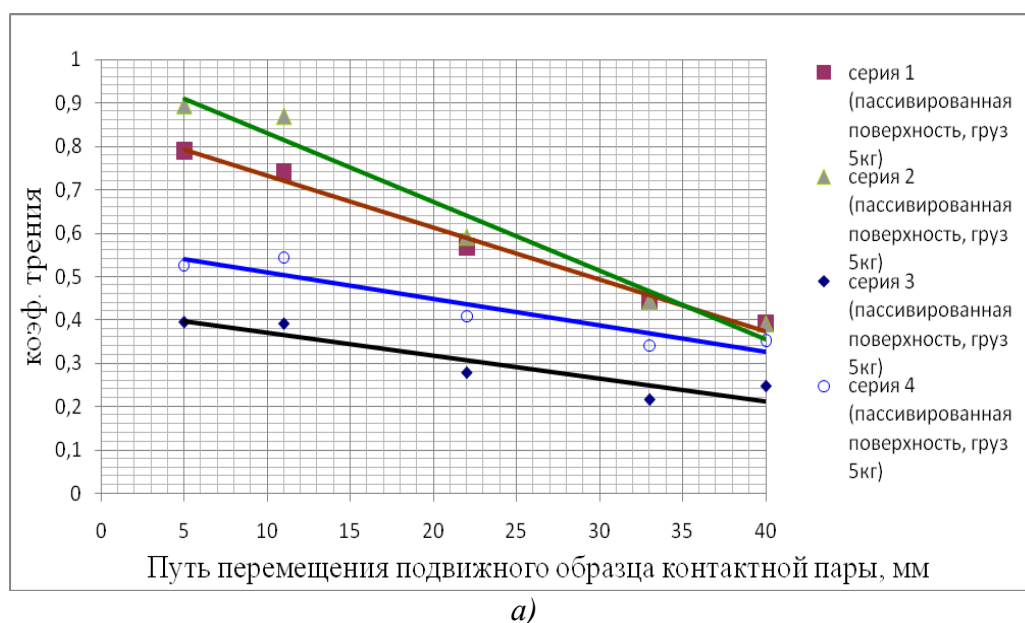
б) На рис. 4 представлены результаты проведенных исследований, полученные в ходе экспериментального исследования в диапазоне удельных нагрузок на контактную пару тре-

ния от 1 до 2,5 кг/см<sup>2</sup>. На рис. 5 изображены графики изменения коэффициента трения от пути перемещения подвижного образца для контактных пар со сформированными оксидными покрытиями на поверхностях образцов.



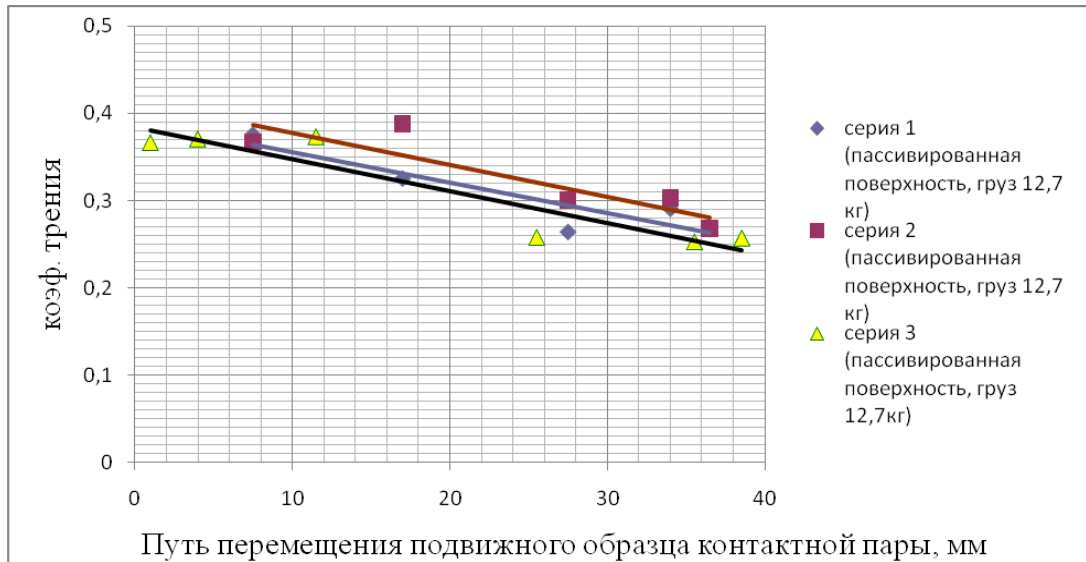
**Рис. 4.** Зависимость коэффициента трения по пути перемещения подвижного образца контактной пары при удельной нагрузке от 1 до 2,5 кг/см<sup>2</sup>

Исследование проводилось в расплаве свинца при температуре 500°С, термодинамической активности O<sub>2</sub> в свинце равной 10<sup>0</sup>, в диапазоне удельной нагрузки на контактную пару трения от 0,5 до 1,2 кг/см<sup>2</sup> (при грузе в 5 кг) и в диапазоне удельной нагрузки от 1 до 2,5 кг/см<sup>2</sup> (при грузе в 12,7 кг). Каждая кривая соответствует отдельной контактной паре трения образцов. Уменьшение коэффициента трения в процессе движения образца, по мнению авторов, может объясняться приработкой поверхностей контакта в процессе относительного движения контактных пар с оксидными покрытиями в среде свинцового теплоносителя.



а)

**Рис. 5.** Зависимость коэффициента трения по пути перемещения подвижного образца контактной пары (пассивированные поверхности образцов):  
а — при удельной нагрузке от 0,5 до 1,2 кг/см<sup>2</sup>

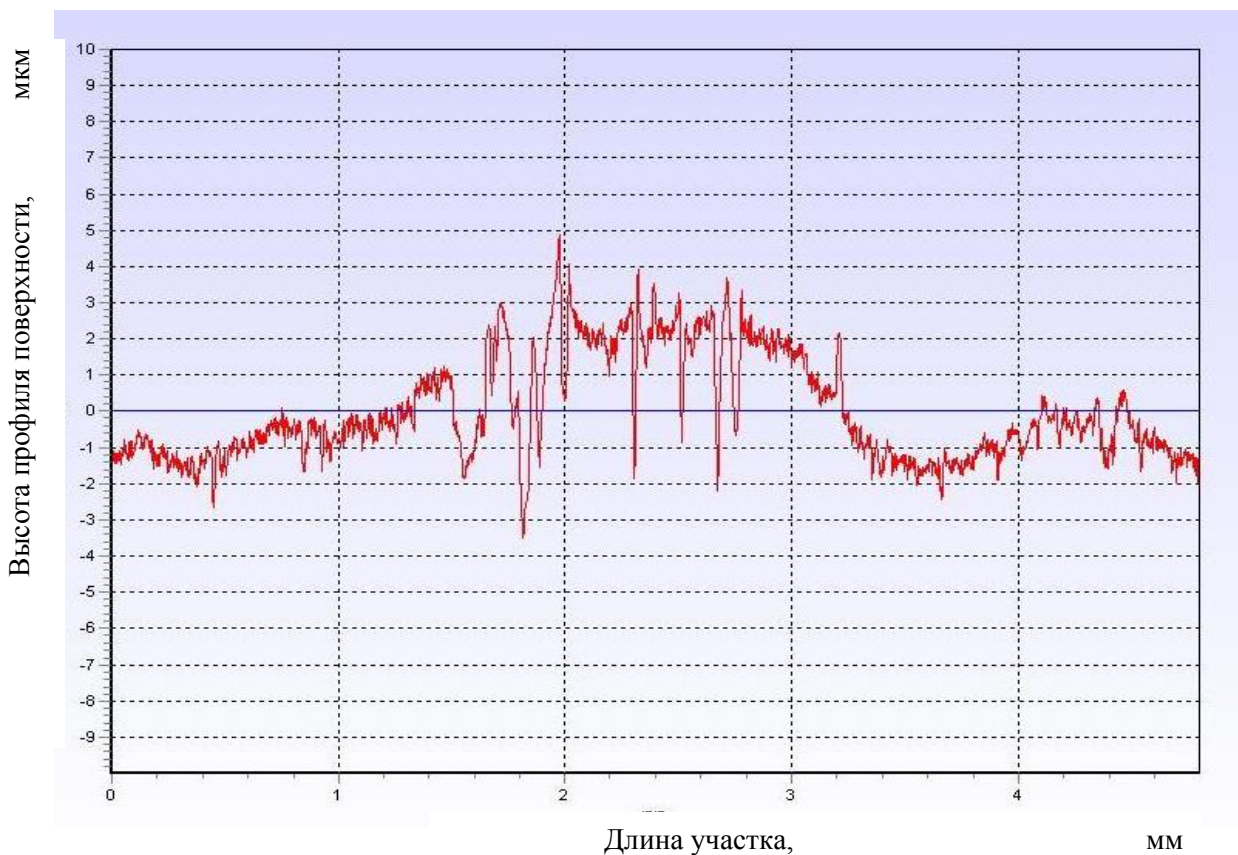


б)

**Рис. 5. Окончание.** б – при удельной нагрузке от 1 до 2,5 кг/см<sup>2</sup>

После проведенных исследований были выполнены материаловедческие исследования образцов контактных пар.

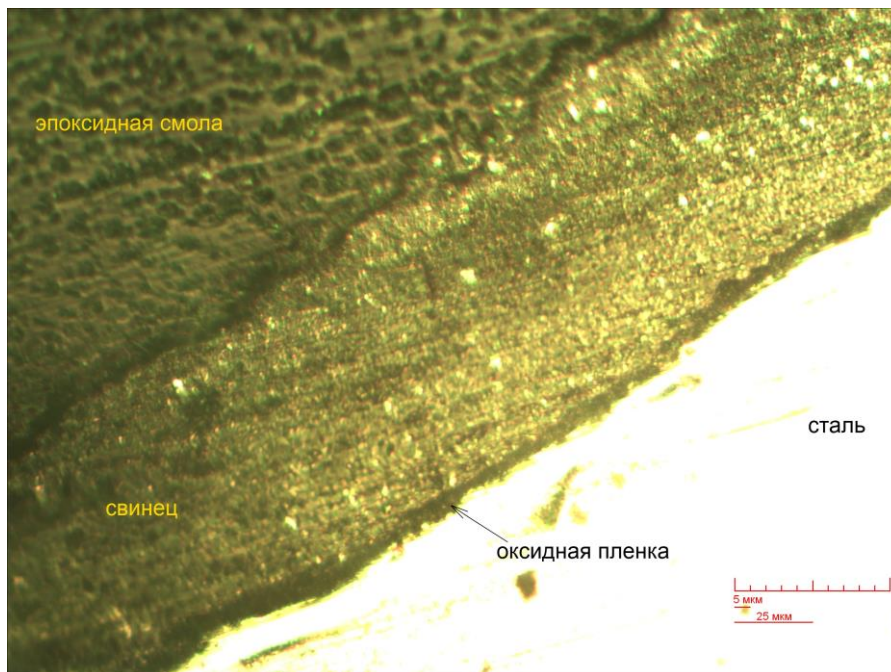
На рис. 6 приведен пример профилограммы поверхностей контактных пар, выполненных из стали аустенитного класса 12Х18Н10Т, после экспериментальных исследований.



**Рис. 6. Профилограмма поверхности контактной пары со сформированным оксидным покрытием после экспериментального исследования в расплаве свинца при  $T = 500^{\circ}\text{C}$ , термодинамической активности кислорода  $10^0$ , удельной нагрузке от 1 до 2,5 кг/см<sup>2</sup>, шероховатости поверхности  $Ra = 0,56$  (x400)**

На рис. 7 изображено фото шлифа образца со сформированным оксидным покрытием после экспериментального исследования в расплаве свинца при  $T = 500^{\circ}\text{C}$ , термодинамической активности кислорода равной  $10^0$ , удельная нагрузка от 1,2 до 2,5  $\text{кг}/\text{см}^2$ . На данном фото четко видны сталь, слой рыхлых отложений, пропитанных свинцом, и между ними слой сформированной оксидной пленки.

На первом этапе экспериментов был апробирован специально созданный для этих целей высокотемпературный статический стенд для определения трибологических характеристик контактной пары в среде высокотемпературного расплава свинца в условиях, приближенных к натурным. В процессе проведения экспериментов были получены данные, подтверждающие зависимость изменения коэффициента трения от наличия оксидной пленки на поверхности образца.



**Рис. 7.** Фото шлифа образца (с сформированным оксидным покрытием) после экспериментального исследования в расплаве свинца при  $T = 500^{\circ}\text{C}$ , термодинамической активности кислорода  $10^0$ , удельной нагрузке от 1 до 2,5  $\text{кг}/\text{см}^2$ ; (x400)

#### *Описание экспериментального стенда ТР-2012НГТУ*

Стенд ТР-2012НГТУ предназначен для определения коэффициента трения контактных пар трения образцов из стали в ТЖМТ при температуре 450 - 550  $^{\circ}\text{C}$  (рис. 8).

На рис. 8 изображены основные элементы высокотемпературного стенда ТР-2012НГТУ.

В состав стенда ТР-2012НГТУ входят следующие элементы (рис. 9).

- рабочая емкость с экспериментальным участком;
- плавильный бак с ТЖМТ;
- система управления оборудованием и регулирования параметров стенда;
- система электроснабжения потребителей стенда;
- система защитного газа.

Плавильный бак заполнен расплавом тяжелого жидкометаллического теплоносителя. Обогрев плавильного бака осуществляется электрическим током нихромовыми электроспиральями. На дне рабочей емкости на площадке размещен образец № 1 выполненный в виде пластины из стали 12X18Н10Т, с поверхностью контакта в состоянии поставки. Образец №2, изготовленный в виде металлического цилиндра, находится над ним и прижимается к нему торцевой поверхностью (шероховатость  $Ra = 3,2$ ) за счет действия устройства, обеспечива-



ющего необходимую силу нагружения экспериментального участка. Удельная нагрузка на контактную пару трения варьировалась: 6, 12 и 23 кг/см<sup>2</sup>. Скорость перемещения образцов контактной пары трения 0,01 м/с

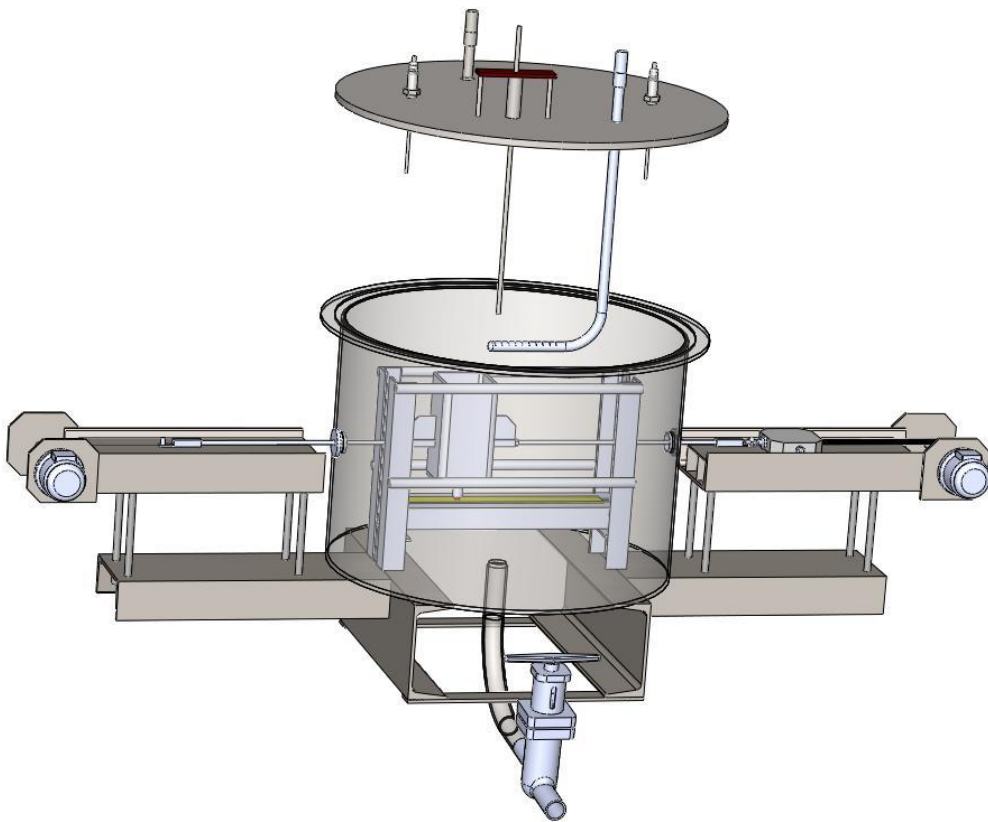


Рис. 8. Модель экспериментального участка высокотемпературного стенда ТР-2012НГТУ

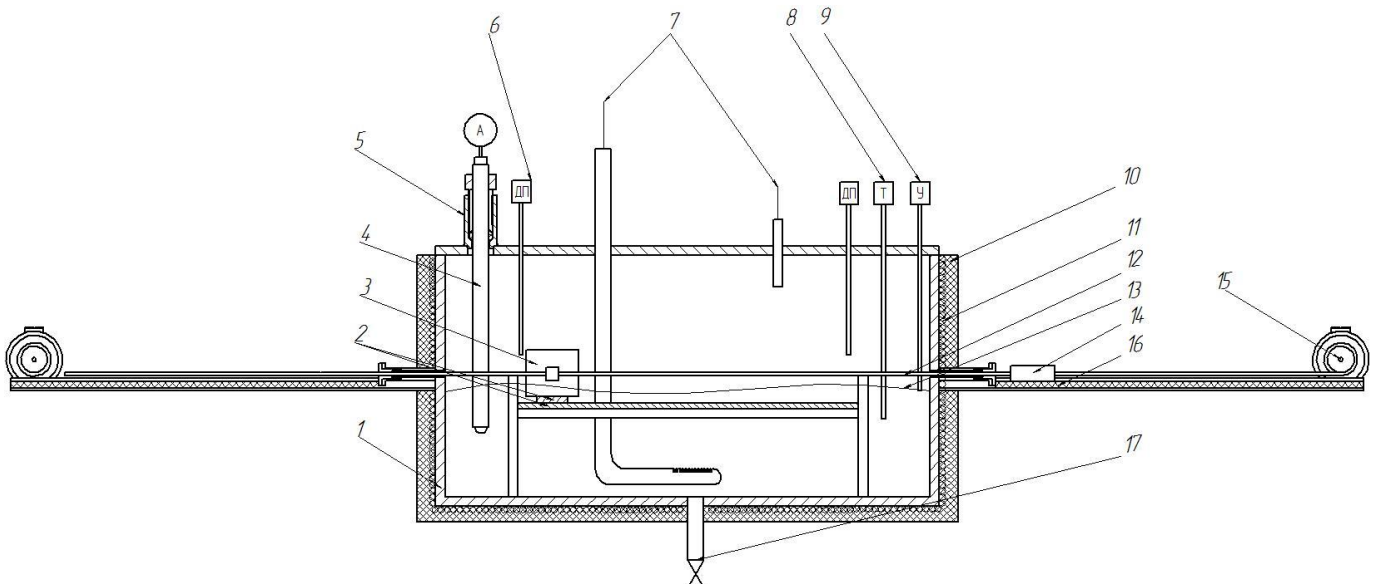


Рис. 9. Схема экспериментального участка высокотемпературного стенда ТР-2012НГТУ:

1 – рабочая емкость; 2 – контактная пара трения; 3 – устройство нагружения; 4 – ДАК; 5 – узел уплотнения ДАК; 6 – электроконтактный датчик положения контактной пары; 7 – трубки подвода и отвода газа; 8 – погружной термопреобразователь; 9 – электроконтактный датчик уровня расплава ТЖМТ; 10 – теплоизоляция; 11 – спираль электрообогрева; 12 – стержень для перемещения контактной пары; 13 – уровень расплава свинца; 14 – тензометрический датчик динамометра ДДУ-3И; 15 – двигатель; 16 – направляющие; 17 – дренаж в плавильный бак

Возвратно-поступательное движение образца №2 относительно образца №1 осуществляется посредством работы двух двигателей, обеспечивающих необходимое тяговое усилие в системе из металлических стержней и датчика динамометра ДОУ-3И. Контактная пара трения погружена в свинцовый теплоноситель.

#### Режимы испытаний

Программа испытаний включала в себя следующее:

- определение силы трения, вносимой конструктивными элементами стенда. Режим «холостой ход». Исследование проводилось без образцов при постоянной скорости перемещения тросов 0,01 м/с, определялась сила тяги, эквивалентная силе трения, вносимой конструктивными элементами стенда при проведении испытаний с контактной парой трения;
- определение коэффициента трения образцов из стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки при температуре 500°С в среде свинцового теплоносителя при постоянной скорости перемещения образцов 0,01 м/с, постоянной термодинамической активности  $O_2$ :  $10^0$  и переменной нагрузке (силе прижатия) удельных давлений: 6, 12 и 23 кг/см<sup>2</sup>;
- определение коэффициента трения запассивированных в расплаве свинца образцов из стали 12Х18Н10Т при температуре 500°С в среде свинцового (свинец-висмутного) теплоносителя при постоянной скорости перемещения образцов 0,01 м/с, постоянной термодинамической активности  $O_2$ :  $10^0$  и переменной нагрузке (силе прижатия) - удельных давлений: 6, 12 и 23 кг/см<sup>2</sup>. Время пассивации образцов 24 ч, условия пассивации - температура расплава свинца 480°С, термодинамическая активность  $O_2$ :  $10^0$ ;
- обобщение и анализ полученных результатов.

#### Обсуждение результатов исследования

Результаты испытаний в среде свинца со сформированным и несформированным оксидным покрытием на поверхностях контакта. Удельная нагрузка - 6, 12 и 23 кг/см<sup>2</sup>.

Условия проведения испытаний: рабочая среда - свинец; температура - 500°С; материал контактной пары - аустенитная сталь 12Х18Н10; состояние контактных поверхностей пары - материал в состоянии поставки Ra = 3,2, поверхности контакта оксидированы и неоксидированы защитной пленкой (PbO); скорость относительного перемещения образцов - 0,01 м/с.

а) На рис. 10 представлены результаты проведенных исследований, полученные в ходе экспериментального исследования при удельной нагрузке на контактную пару трения 6 кг/см<sup>2</sup>.

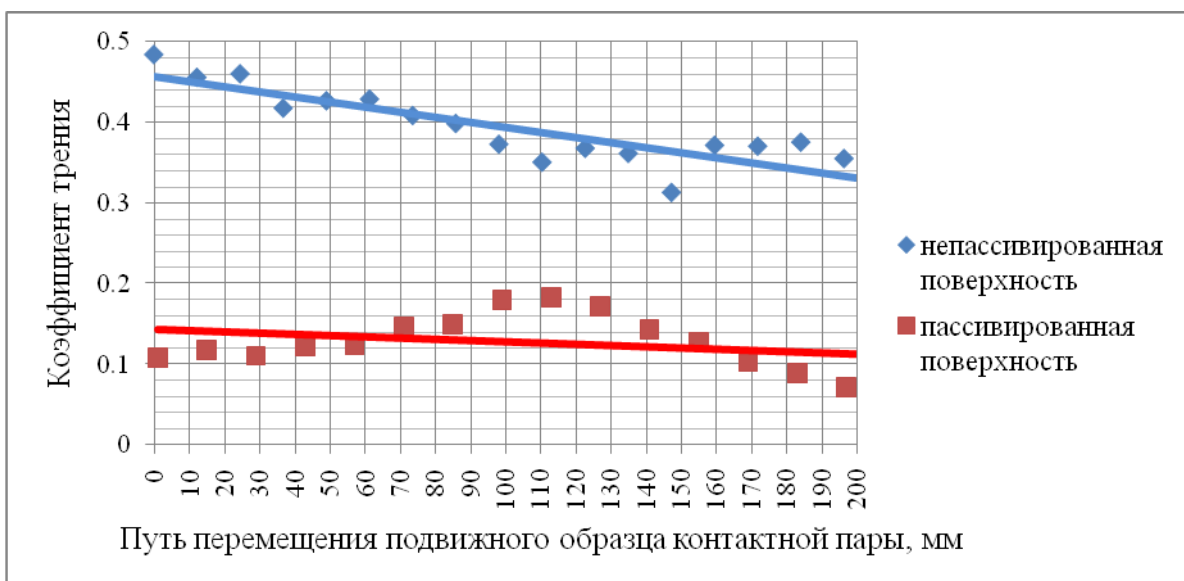
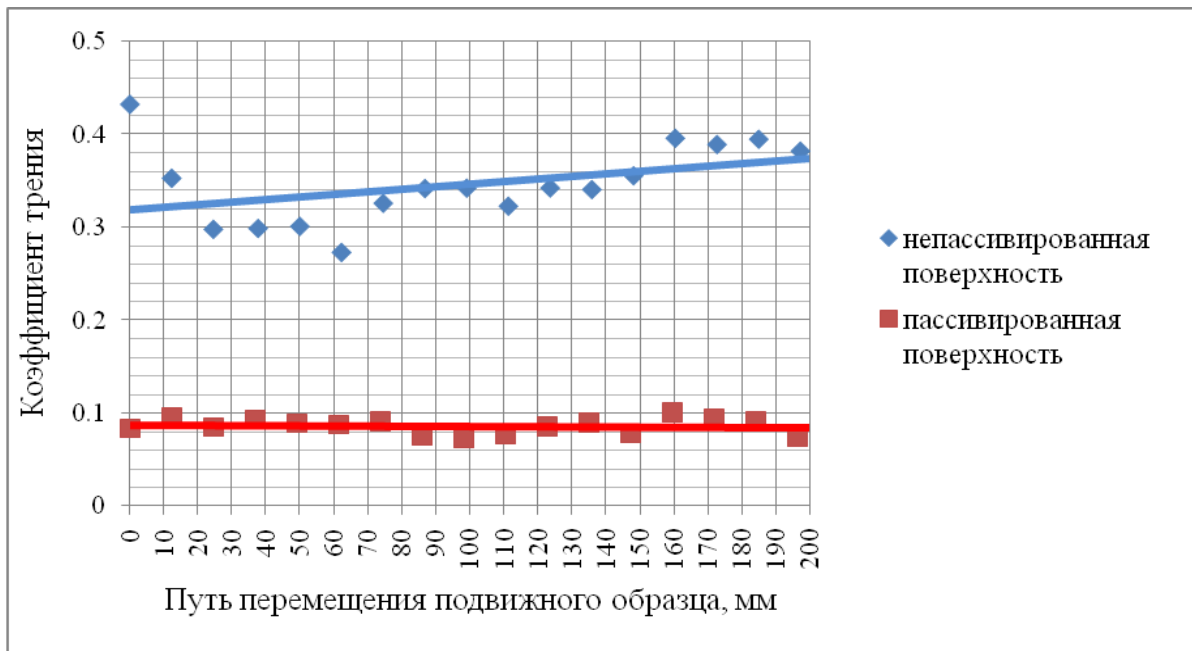


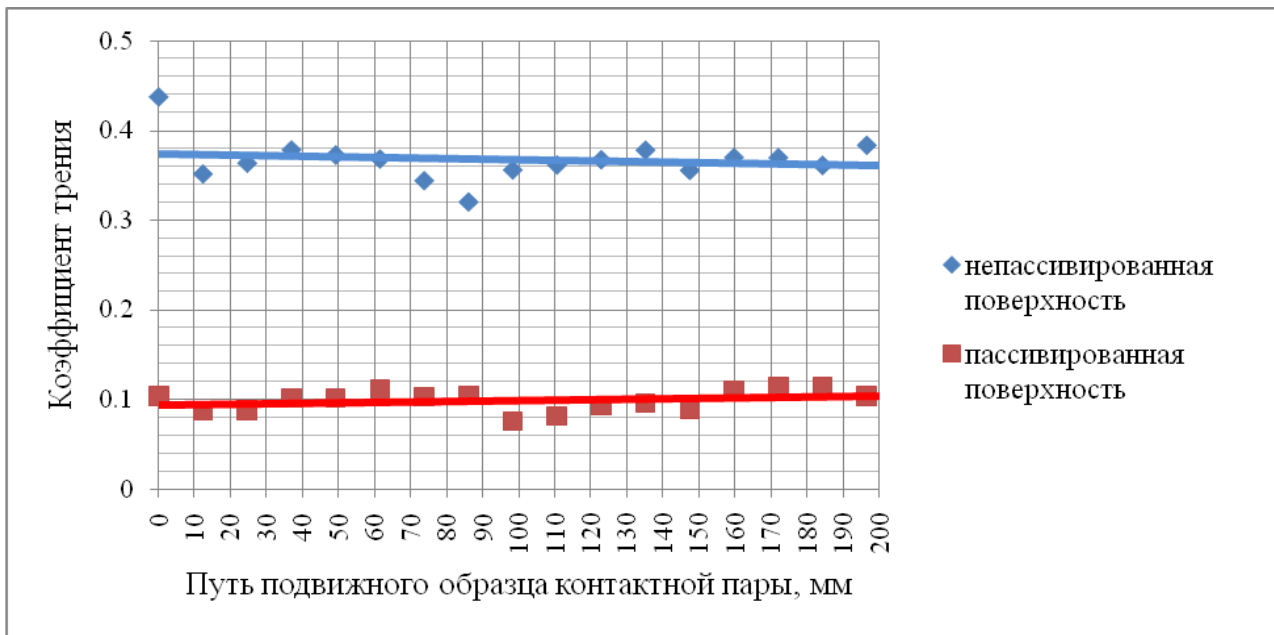
Рис. 10. Зависимость коэффициента трения по пути перемещения подвижного образца контактной пары при удельной нагрузке 6 кг/см<sup>2</sup>

б) На рис. 11 представлены результаты проведенных исследований, полученные в ходе экспериментального исследования при удельной нагрузке на контактную пару трения  $12 \text{ кг/см}^2$ .



**Рис. 11. Зависимость коэффициента трения по пути перемещения подвижного образца контактной пары при удельной нагрузке  $12 \text{ кг/см}^2$**

б) На рис. 12 представлены результаты проведенных исследований, полученные в ходе экспериментального исследования при удельной нагрузке на контактную пару трения  $23 \text{ кг/см}^2$ .



**Рис. 12. Зависимость коэффициента трения по пути перемещения подвижного образца контактной пары при удельной нагрузке  $23 \text{ кг/см}^2$**

На рис. 13 и рис. 14 приведены примеры профилограмм поверхностей контактных

пар, выполненных из стали аустенитного класса 12X18Н10Т, после экспериментальных исследований при удельной нагрузке  $12 \text{ кг/см}^2$ .

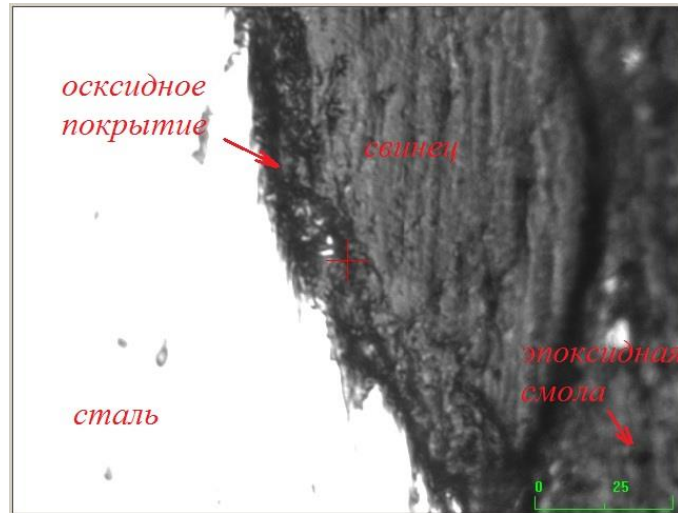


**Рис. 13.** Профилограмма поверхности контактной пары без сформированного оксидного покрытия после экспериментального исследования в расплаве свинца при  $T = 500^\circ\text{C}$ , термодинамической активности кислорода  $10^0$ , удельной нагрузке  $12 \text{ кг/см}^2$ , шероховатости поверхности  $Ra = 3,5$



**Рис. 14.** Профилограмма поверхности контактной пары со сформированным оксидным покрытием после экспериментального исследования в расплаве свинца при  $T = 500^\circ\text{C}$ , термодинамической активности кислорода  $10^0$ , удельной нагрузке  $12 \text{ кг/см}^2$ , шероховатости поверхности  $Ra = 1,8$  (x400)

На рис. 15 изображено фото шлифа образца со сформированным оксидным покрытием после экспериментального исследования в расплаве свинца при  $T = 500^\circ\text{C}$ , термодинамической активности кислорода  $10^0$ , удельная нагрузка  $12 \text{ кг/см}^2$ . На данном фото четко видны сталь, слой рыхлых отложений, пропитанных свинцом, и между ними слой сформированной оксидной пленки.



**Рис. 17.** Фото шлифа образца со сформированным оксидным покрытием после экспериментального исследования в расплаве свинца при  $T = 500^\circ\text{C}$ , термодинамической активности кислорода  $10^0$ , удельной нагрузке  $23 \text{ кг/см}^2$  ( $\times 400$ )

### Выводы

1. Впервые произведено определение триботехнической характеристики - коэффициента трения и его изменения в высокотемпературном свинцовом теплоносителе при  $T = 500\text{-}550^\circ\text{C}$ , удельных нагрузках от  $0,5$  до  $23 \text{ кг/см}^2$  и скорости относительного перемещения образцов  $0,005$  и  $0,01 \text{ м/с}$  при контролируемой и фиксируемой термодинамической активности кислорода в теплоносителе ( $a \approx 1$ ).

2. Полученные экспериментальные данные показывают, что наличие сформированных оксидных покрытий на поверхностях контактной пары снижает коэффициент трения по сравнению с аналогичной характеристикой при отсутствии оксидных покрытий.

3. Результаты проведенных экспериментов показывают следующие зависимости триботехнической характеристики: коэффициента трения запассивированных и незапассивированных образцов из стали 12X18H10T в среде свинцового теплоносителя при т/а  $\text{O}_2$  в свинце  $a = 10^0$ ,  $T = 500\text{-}550^\circ\text{C}$ :

- ◆ при удельном давлении прижатия образцов  $p = 0,5 - 2,5 \text{ кг/см}^2$  и средней скорости перемещения образцов  $V = 0,005 \text{ м/с}$  :
  - для образцов со сформированными оксидными покрытиями с коэффициентом трения  $\kappa = 0,8\text{-}0,3$  он монотонно убывает при взаимном перемещении образцов;
  - для образцов без оксидных покрытий с коэффициентом трения  $\kappa = 0,3\text{-}0,8$  он монотонно возрастает при взаимном перемещении образцов;
- ◆ при удельном давлении прижатия образцов  $p = 6 \text{ кг/см}^2$  и средней скорости перемещения образцов  $V = 0,01 \text{ м/с}$  :
  - для образцов со сформированными оксидными покрытиями с коэффициентом трения  $\kappa = 0,12\text{-}0,1$ . Данный диапазон значений характерен для всего экспериментального участка;
  - для образцов без оксидных покрытий с коэффициентом трения  $\kappa = 0,45\text{-}0,32$  он монотонно убывает при взаимном перемещении образцов;
- ◆ при удельном давлении прижатия образцов  $p = 12 \text{ кг/см}^2$  и средней скорости перемещения образцов  $V = 0,01 \text{ м/с}$  :
  - для образцов со сформированными оксидными покрытиями с коэффициентом трения  $\kappa = 0,1$  данное значение характерно для всего экспериментального участка;
  - для образцов без оксидных покрытий с коэффициентом трения  $\kappa = 0,32\text{-}0,38$  он монотонно возрастает при взаимном перемещении образцов;

- ◆ при удельном давлении прижатия образцов  $p = 23 \text{ кг/см}^2$  и средней скорости перемещения образцов  $V = 0,01 \text{ м/с}$  :
  - для образцов со сформированными оксидными покрытиями с коэффициентом трения  $\kappa = 0,08$  данное значение характерно для всего экспериментального участка;
  - для образцов без оксидных покрытий с коэффициентом трения  $\kappa = 0,38-0,36$  он монотонно убывает при взаимном перемещении образцов.

4. Сравнение профилограмм контактных поверхностей образцов из стали 12X18H10T со сформированными покрытиями и без них до и после испытаний в свинцовом теплоносителе при указанных выше условиях показывает следующее:

- ◆ при удельной нагрузке от 1 до  $2,5 \text{ кг/см}^2$ :
  - для образцов со сформированными оксидными покрытиями изменение среднего арифметического отклонения профиля Ra составило 0,25 (образец до экспериментального исследования) до 0,56;
  - для образцов без оксидных покрытий изменение среднего арифметического отклонения профиля Ra составило 0,25 (образец до экспериментального исследования) до 0,71;
- ◆ при удельной нагрузке  $12 \text{ кг/см}^2$ :
  - для образцов со сформированными оксидными покрытиями изменение среднего арифметического отклонения профиля Ra составило 0,25 (образец до экспериментального исследования) до 1,8;
  - для образцов без оксидных покрытий изменение среднего арифметического отклонения профиля Ra составило 0,25 (образец до экспериментального исследования) до 3,5.

5. Сравнение фотографий шлифов контактных поверхностей образцов из стали 12X18H10T со сформированными покрытиями и без них до и после испытаний в свинцовом теплоносителе при указанных условиях показывает следующее:

- для образцов со сформированными оксидными покрытиями поверхность получила незначительные изменения: высоты и впадины профиля до 10 мкм. На фото шлифа четко видны сталь, слой сформированной защитной оксидной пленки, слой рыхлых отложений, пропитанных свинцом.
- для образцов без оксидного покрытия на поверхности большие изменения: высоты и впадины профиля до 20 мкм.

Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей инновационных реакторных установок пары трения характеризуются новыми, неизвестными ранее свойствами:

- интенсивным теплоотводом от места контактного трения оксидированных поверхностей конструкционных материалов;
- исключением непосредственного контакта твердых поверхностей (стали, чугуна) контактных пар в среде свинцового и свинец-висмутового теплоносителей вследствие формирования на них специфичных оксидных покрытий;
- существенным уменьшением коэффициента трения контактных пар в среде высокотемпературных свинцового и свинец-висмутового теплоносителя, что способствует увеличению ресурса работы контактных пар в рассматриваемых условиях.

Работа проводилась при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0322.

#### Библиографический список

1. **Безносков, А.В.** Оборудование, компоновка и режимы эксплуатации контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова. – Н. Новгород, НГТУ им. П.Е. Алексеева, 2011.

2. Экспериментальные исследования характеристик пристенной области ТЖМТ – конструкционный материал методом «экспресс замораживания»: отчет по НИР (инициативный) / НГТУ; рук. Безносов А.В.; исп. Махов К.А. [и др.]. – Н. Новгород, 2012.

*Дата поступления  
в редакцию 15.07.2013*

**Yu. N. Drozdov, A.V. Beznosov, T.A. Bokova, A.I. Shumilkov, K.A. Strides, A.S. Blackie**

**EXPERIMENTAL STUDY OF PERFORMANCE FRICTION IN LONGITUDINAL  
BACK-AND-FORTH MOVEMENT OF THE SAMPLE A MEDIUM  
LIQUID HEAVY METAL**

Institute of mechanical engineering n.a. A.A. Blagonravova of the Russian Academy of Sciences,  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

**Purpose:** The paper presents the results of experimental studies on the tribological characteristics of friction in the environment of high temperature lead coolant in a longitudinal reciprocating movement of specimens made of austenitic steel 12X18H10T. The purpose of the pilot study was to obtain the dependence of the coefficient of friction effects on the applied load the contact pair of oxidized and non-acidic samples of steel 12X18H10T.

**Design/methodology/approach:** Investigations were carried out on two high stands on similar techniques. Parameters Booth lead melt temperature - 500°C, the active oxygen content at saturation line lead, the state pairs of contact surfaces - the material as supplied and formed on surfaces of samples of oxide coatings, a specific load - from 0.5 to 23 kg/cm<sup>2</sup> speed specimens relative movement 0.005-0.01 m/s.

**Research limitations/implications:** First made the definition of the tribological characteristics - the coefficient of friction and changes in the melt lead, showed that the presence of oxide coatings formed on the surfaces of the contact pair reduces the coefficient of friction compared with the same characteristics in the absence of oxide coatings. After conducting research, materials research carried profilograms contact surfaces of specimens of steel 12X18H10T with formed coatings and without them before and after the test in lead coolant under the above conditions. Micrographs were made samples from the contact surfaces are formed 12X18H10T with or without coatings before and after the test lead coolant at the above conditions. The results of these studies are important for the reactor circuits NPPs with the BREST and MTBF with lead and lead-bismuth coolant.

**Originality/value:** The research results suggest that in an environment of heavy liquid metal reactor plants innovative friction pairs are characterized by new, previously unknown properties:

- Intense heat removal from the place of contact friction oxidized surfaces of construction materials;
- Except for the direct contact of solid surfaces (steel, cast iron) contact pairs in the environment lead and lead-bismuth coolant due to the formation of these specific oxide coatings;
- A significant reduction in the coefficient of friction of contact pairs in an environment of high-lead and lead-bismuth coolant, thus increasing the service life of the contact pairs in these conditions

*Key words* tribological, high temperature lead coolant, reactor plants, samples of steel, the coefficient of friction, contact surfaces.