**Наименование проекта**

Повышение работоспособности тяжелонагруженых узлов трения путем формирования мультимодальных покрытий триботехнического назначения

**Наименование Заказчика**

Федеральное агентство железнодорожного транспорта (РОСЖЕЛДОР)

**№ Соглашения или Договора**

Протокол Росжелдора от 15.04.2020 г. № ВЧ-24

**Сроки выполнения**

Год начала: 2020

Год окончания: 2020

**Наименование этапов работ и что по ним выполнено**

Этап: Повышение работоспособности тяжелонагруженных узлов трения путем формирования мультимодальных покрытий триботехнического назначения

Объектом исследований выступали образцы из стали 38Х2МЮА с предварительно нанесенными шликерными покрытиями различного состава, подвергшиеся лазерной обработке.

Цели работы: создание научных и технологических основ наноинженерии поверхностей мультимодальных покрытий с целью создания высокоэффективных материалов триботехнического назначения.

Для реализации поставленной цели были выполнены следующие работы:

1. Синтез нестехиометрических неорганических компонентов шликера.

2. Разработка методики модификации поверхностности металлических тел.

3. Формирования поверхностного слоя с использованием концентрированных потоков энергии.

4. Проведение металлофизических исследований с целью изучения стабильности технологических параметров модифицирования поверхности металлических тел.

5. Исследование трибологических характеристик модифицированных образцов на комплексе оборудования для проведения трибологических испытаний.

6. Исследование структурно-фазовых изменений поверхностей трибоконтакта, их фазовый и химический состав методом электронной микроскопии с микроанализатором.

7. Разработка метода контроля качества модифицирования поверхности, основанного на применении метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Получение рентгеновских фотоэлектронных спектров элементов в модифицированных слоях сталей и сформированных на сталях защитных слоях и исследование химического состояния их поверхностей.

8. Изучение влияния состава шликера, подготовки поверхности и режимов обработки на эксплуатационные свойства поверхности трибосопряжений.

Сегодня становится совершенно очевидным, что высокая надежность и работоспособность различных узлов трения определяется их высокой несущей способностью, износостойкостью поверхностного слоя. От структуры, состояния и свойств материала поверхностного слоя зависит способность трибосистем машин, механизмов и устройств длительно эффективно выполнять заданные функции. Именно поэтому в трибологии формируется новое научное направление – инженерия поверхности, чему и посвящена наша работа.

С точки зрения модифицирования поверхности трибосопряжения к наиболее перспективным методам следует отнести обработку концентрированными потоками энергии (КПЭ), а также применение износостойких антифрикционных покрытий.

Одним из наиболее технологически доступных и эффективных методов модификации и упрочнения поверхности с применением КПЭ является лазерное облучение (ЛО).

Помимо ЛО, как показали наши исследования, весьма эффективными являются вакуумные ионно-плазменные технологии. Однако сфера применения вакуумной технологии для тяжелонагруженных трибосистем подвижного состава малоэффективна из-за дороговизны вакуумной технологии, а лазерная обработка происходит на воздухе, является экологически чистой, обладает простотой автоматизации и может применяться в полевых условиях.

Обобщающие результаты по изучению влияния состава шликера и режимов обработки на эксплуатационные свойства поверхности трибосопряжений:

1. Перед лазерной обработкой поверхности изделия подвергаются механической обработке с последующим нанесением шликерной обмазки. Отбор исходных материалов (компонентов шликера) для лазерной обработки производится с учетом термодинамического и теплофизического критериев, в частности, взаимной растворимости в твердом, жидком или смешанном состояниях.
2. Нами применен метод восстановления нестехиометрических соединений из растворов (восстановление водородом на цинке в водном солянокислом растворе) для получения нестехиометрических соединений W и Мо в виде ультрадисперсных порошков, в том числе нанопорошков, для последующего их использования в качестве компонентов шликера. Кроме это, рассмотрена возможность синтеза нестехиометрических соединений непосредственно в процессе обработки концентрированными потоками энергии. Так, при использовании в качестве легирующего компонента шликера ультрадисперсного порошка алюминия с размером частиц 50-150 нм в процессе обработки КПЭ при взаимодействии с кислородом воздуха и оксидами железа наблюдается его окисление с образованием керамических наночастиц. Таким образом нано-Al2O3 нестехиометрического состава синтезируется в процессе лазерной обработки. Такой подход обеспечивает уменьшение технологических операций при формировании модифицированных слоев.
3. Выполненные комплексные металлофизические исследования с использованием методик оптической и электронной микроскопии, рентгеноспектрального и энергодисперсионного анализа, непрерывного микроиндентирования показали, что лазерная обработка исследуемой стали благодаря сверхвысокой скорости нагрева (104-106 град./с) и быстрому теплоотводу в массу металла увеличивает твердость локальных областей поверхности стального изделия. Так, экспериментально показано, что обработка поверхности стали 38Х2МЮА непрерывным излучением волоконного лазера в режиме с оплавлением поверхности приводит к увеличению микротвердости в зоне лазерного воздействия в ~ 1,6–1,7 раза, а в режиме без оплавления – в ~ 1,4-1,5 раза. При этом микротвердость зоны лазерного воздействия определяется в основном мощностью лазерного излучения и слабо зависит от скорости сканирования лазерного луча.
4. Установлено, что при высокой плотности концентрированного потока энергии лазера часть легирующих элементов и углерода выгорает, и микротвердость в наплавленном слое понижается, появляются дефекты в виде пор. При низких значениях плотности потока происходит неполное сплавление шликерного материала и снижается микротвердость наплавленных слоев. Распределение микротвердости в покрытиях может выступать в качестве одного из параметров, характеризующих износостойкость материала, когда действует механизм абразивного изнашивания:



здесь *К* - коэффициент, зависящий в основном от абразивных свойств истирающей поверхности и условий испытания, *р* - нагрузка, *H* - твердость, *L* – путь трения, *β* – размер абразивного зерна. Определявшиеся в работе механические характеристики поверхности могут служить качественным критерием износостойкости покрытий при абразивном износе, в том числе при одновременном термическом воздействии. Увеличение микротвердости в сравнении с основным металлом в 1,5 раза может привести к повышению износостойкости покрытия в 2—10 раз. Указанный подход является вполне корректным оценочным приближением.

Установлено влияние тугоплавких и легкоплавких компонентов шликера на механические характеристики. Показано, что при использовании покрытий, содержащих тугоплавкие компоненты (W, Mo, Cr, Ni), зона лазерной закалки имеет более высокий уровень твердости, чем зона оплавления, а при содержании в обмазке легкоплавких компонентов (Al, фторопласт) картина меняется на противоположную.

1. Разработана методика трибологических испытаний образцов, прошедших шликирование с лазерной обработкой. Оценка результатов трибологических испытаний показывает, что сочетание лазерной обработки и предварительного шликирования, показывает снижение интенсивности износа даже несмотря на весьма высокие значения коэффициента трения. Наилучшие показатели интенсивности износа наблюдались у образцов с покрытиями, содержащими порошок алюминия и фторопласт, а также 0,1WO3×1.06H2O с добавлением диоксида кремния. Полученные результаты трибологических испытаний позволяют считать, что основным условием высокой износостойкости для выбранных покрытий является их надежная работа при высоких нагрузках и малых скоростях.
2. С привлечением метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии установлено, что наличие поверхностной пленки оксида железа FeO на поверхности стали определяет ее низкие износные характеристики, а толстый слой содержащий оксиды Fe2O3, Fe3O4, обеспечивает высокую износостойкость стали после лазерной модификации. Толщина оксидных слоев на поверхности модифицированной стали, их фазовый состав (FeO, Fe2O3, Fe3O4) способствует понижению интенсивности поля напряжений, температурной и силовой нагруженности на контактных поверхностях инструмента, и приводит к увеличению стойкости поверхности узлов триботехнического назначения.

Частицы металла, находящиеся в поверхностных слоях пленки покрытия, после обработки КПЭ ультрадисперсного порошка алюминия и фторопласта, вступают в химическую связь с продуктами деструкции модифицированного покрытия. Перспективными материалами для узлов трения являются пленки, содержащие в своем составе атомы фтора.

По итогам выполнения проекта сформированы научные и технологические основы создания триботехнических материалов с высоко стабильными поверхностными слоями для применения в тяжелонагруженных узлах трения путем структурного модифицирования материалов трибосистемы в результате лазерной обработки поверхности с нанесенной шликерной обмазкой.

Задачей дальнейших исследований является рациональный подбор легирующих покрытий (обмазок) для целенаправленного конструирования износостойких структур лазерной обработки для трибологического, антиэрозионного и других промышленных применений. Сформированная структура лазерной обработки может также существенно варьироваться путем дополнительной послелазерной термической, механической или термо-механической обработки. К настоящему времени перспективы такой обработки ещё недостаточно изучены.

Значимость данного проекта обусловлена, прежде всего, возрастающими требованиями к надежности и долговечности узлов трения, а также расширением возможности эксплуатации этих узлов в различных климатических условиях. Полученные при выполнении проекта результаты планируются к внедрению в технологический процесс ремонтных предприятий железнодорожного транспорта.

Полученные результаты работы соответствуют современному научно-техническому уровню исследований в рассматриваемой области. Это следует, во-первых, из выполненного анализа публикаций, который подтвердил, что проведенные проектные исследования и разработки актуальны и позиционируются в “mainstream” современной науки. Об этом также свидетельствуют характеристики использованного в проекте методического обеспечения, исследовательского, диагностического и технологического оборудования, разработанного ведущими мировыми производителями.

**Перечень основных публикаций по результатам работ**

а) Публикации по результатам исследований в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus или в базе данных "Сеть науки" (WEB of Science):

- Surface Modification Features of Tool Steels by Laser Radiation / A.V. Sidashov, A.T. Kozakov, V.I. Kolesnikov, D.S. Manturov [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2020. – Vol. 41. – № 6. – P. 549–553

б) Публикации по результатам исследований в научных журналах, индексируемых в базе данных РИНЦ:

- Повышение износостойкости тяжелонагруженных узлов трения подвижного состава / В.И. Ко¬лесников, Д.С. Мантуров, И.В. Колесников, В.В. Шубитидзе // Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт-2020». – Ростов-н/Д, 2020. – С. 234-237;

- Повышение долговечности узлов трения путем структурной модификации в результате лазер¬ной обработки поверхности с нанесенной шликерной обмазкой / П.Г. Иваночкин, А.И. Воропаев, И.В. Колесников, М.В. Бойко [и др.] // Новые материалы и технологии в машиностроении. – Брянск, 2020. – № 32. – С. 30-34;

- Изучение влияния состава шликерного покрытия, обработанного лазерным облучением, на металлофизические и эксплуатационные свойства поверхности трибосопряжений / В.И. Колесников, Д.С. Мантуров, К.И. Карпенко, С.А. Данильченко [и др.] // Вестник РГУПС. – 2020. – № 4. – С. 15–22;

- Сидашов, А.В. Исследование фторопластсодержащего наноструктурированного покрытия на поверхности стали / А.В. Сидашов, М.В. Бойко, А.Т. Козаков // Труды РГУПС. – 2020. – № 4. – С. 96–101;

в) Патентные заявки, поданные по результатам исследований и разработок, в том числе в Евразийское патентное ведомство или иные зарубежные патентные ведомства:

- копия заявки на патент «№2020138154, 19.11.2020. Состав шихты для шликерных покрытий / В.И. Колесников, А.П. Сычев Александр, И.В. Колесников [и др.]»;

г) Участие в мероприятиях по демонстрации и популяризации результатов проекта:

- 20 - 22 апреля 2020 г. Международная научно-практическая конференция "Транспорт: нayка, образование, производство" ("Транспорт-2020");

- 23 - 25 ноября 2020 г. 12-ая Международная научно-практическая конференция (Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава).