

максимальное значение по оси симметрии шины составляет 36-37 мм. Тогда как при избыточном давлении воздуха в шине 1,7 МПа эти же показатели соответственно составили 21,96-26,75 мм и 42-50 мм и при 2,2 МПа 27,54-30,33 мм и 50-55 мм.

Результаты экспериментов показали, хотя имеется явная тенденция увеличения глубины колеи при минимальной базе трактора, но разница небольшая, следовательно, изменение базы трактора в пределах от 2,2-2,9 м не оказывает существенного влияния на глубину колеи следов колес трактора.

Такое изменение глубины колеи следов колес трактора происходит из-за перераспределения эксплуатационной массы трактора при переводе его базы с максимальной величины на минимальную или же наоборот. Проведенные замеры показали, что при переводе трактора на минимальную базу нагрузка передних колес на почву возрастает из-за роста перераспределенной эксплуатационной массы в среднем на 152,8 кг.

**Заключение.** Проведенными исследованиями установлено, что изменение базы трактора приводит к изменению глубины колеи колес трактора в зависимости от скорости движения трактора и избыточного давления воздуха в шине в среднем от 18,16 мм до 30,33 мм, при этом глубина колеи при минимальной базе больше, чем у максимальной базы трактора. Следует также отметить, что максимальное значение глубины колеи по оси симметрии шины в зависимости от скорости движения трактора и избыточного давления воздуха в шине составляет от 20,96 мм до 55 мм.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Система машин и технологий для комплексной механизации сельскохозяйственного производства на 2011-2016 гг. Ч. 1, растениеводство. Ташкент: НПЦ при МСВХ РУз, 2012. – 199 с.
2. Сельскохозяйственная техника: Каталог Том 1. «Энергетические, транспортные и погрузочные средства. – Ташкент: НИИМСХ, 2020. – 303 с.
3. Ахметов, А. А. Вопросы расширения диапазона применения колесных тракторов // *Irrigatsiya va melioratsiya*, 2018. – №1(11). – С. 55-59.
4. Ахметов, А. А. Универсально-пропашной трактор с изменяемой базой. / А. А. Ахметов, И. И. Усманов /– Ташкент: Фан, 2018. – 176 с.
4. Akhmetov, A. A. Universal row-crop tractors for inter-row cultivation of cotton crops. – Tashkent: Fan. – 2017. – 240 p.
5. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний. – М.: Наука, 1971. – 240 с.
6. Анилович, В. Я. Конструирование и расчет сельскохозяйственных тракторов. / В. Я. Анилович, Ю. Т. Водолаженко – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.

УДК 621. 793.

#### **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ И СКОРОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ БРОНЗОВЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

*А. А. Болдуева, ФММП БНТУ, г. Минск,  
доктор техн. наук, профессор О. Г. Девойно МСФ БНТУ, г. Минск,  
канд. техн. наук, доцент М. А. Кардаполова, МСФ БНТУ, г. Минск,  
И. М. Косякова, ФММП БНТУ, г. Минск*

**Резюме.** В статье приведены результаты исследований влияния лазерного легирования и закалки на трибологические свойства газотермического покрытия из никель-алюминивой бронзы.

**Ключевые слова:** коэффициент трения, температура в зоне трения, скорость изнашивания, лазерное легирование, лазерное оплавление, бронза.

**Введение.** Никель-алюминиевые бронзы широко применяются в различных областях благодаря своим высоким механическим свойствам и эксплуатационным характеристикам. Эти свойства могут быть дополнительно улучшены с помощью различных процессов лазерной обработки.

Поэтому предметом данного исследования стал анализ трибологических свойств газотермических покрытий из бронзы после лазерного легирования и закалки.

**Основная часть.** Для исходного газотермического покрытия был выбран порошок из никель-алюминивой бронзы - БрА7Н6Ф (таблица 1), размером частиц 80-100 мкм. Выбор обусловлен его доступностью и широким применением в различных отраслях промышленности.

Таблица 1 – Химический состав никель-алюминиевого бронзового порошка БрА7Н6Ф

| Элемент       | Алюминий | Никель | Фосфор | Медь |
|---------------|----------|--------|--------|------|
| Содержание, % | 7        | 5,5    | 1      | 86   |

Параметры для газотермического нанесения бронзового покрытия были выбраны на основании исследования, изложенного в статье [1]. Установка плазменного напыления УПУ-3Д с плазмотроном ПП-25 была использована для создания бронзового покрытия. Расстояние от сопла плазмотрона ПП-25 до поверхности

образцов для напыления – 120 мм, параметры газотермической обработки представлены в таблице 2. До напыления поверхность образцов, изготовленных из стали 45, была обработана дробеструйным методом.

Таблица 2 – Параметры газотермического напыления порошка БрА7Н6Ф на

| Ток дуги, А | Рабочее напряжение, В | Газ и его расход, м <sup>3</sup> /ч |   | Толщина слоя покрытия, мм | Коэффициент расхода порошка, % | Производительность, кг/ч |
|-------------|-----------------------|-------------------------------------|---|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|
|             |                       | Плазмообразующий                    | Транспортирующий                          |                           |                                |                          |
| 200         | 90-100                | Азот технический ГОСТ 9293-74 2,5   | Азот технический ГОСТ 9293-74 0,020-0,025 | 0,6-0,7                   | 83-86                          | 7                        |

Для последующего лазерного легирования полученного газотермического покрытия были выбраны твердые керамические частицы карбидов WC и Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>, размером 2-50 мкм [2]. Эти частицы карбидов вместе с клем БФ-2 наносились на полученное ранее газотермическое покрытие из бронзы равномерным слоем, толщиной ~ 0,1 мм.

В качестве оборудования для лазерного модифицирования был выбран – волоконный иттербиевый лазер YLR-2000 мощностью 2 кВт и длиной волны излучения 1,064 мкм. Параметры обработки были выбраны на основе полного факторного эксперимента типа 2<sup>2</sup> и указаны в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры лазерной обработки газотермического покрытия из БрА7Н6Ф

| Характеристики лазерного пятна |                          |     | Скорость перемещения лазерного пятна, мм/мин |     |
|--------------------------------|--------------------------|-----|--|-----|
| Размер, мм                     | Площадь, мм <sup>2</sup> | Код | Значение                                     | Код |
| 2x0.5                          | 1                        | -1  | 100  | -1  |
| 2x0.5                          | 1                        | -1  | 300  | 1   |
| 3x1                            | 3                        | 1   | 100  | -1  |
| 3x1                            | 3                        | 1   | 300  | 1   |

Исследования процессов трения и износа выполнялись на триботестере А-135 по схеме ролик-колодка в условиях концентрированного контакта и высоких нагрузок. В тестере используется программный контроль изменения во времени значений коэффициента трения с помощью датчика момента и температуры в зоне трения с помощью хромель-алюмелевой термопары. Сигналы регистрируются системой управления и обрабатываются с помощью оригинального программного обеспечения. В отличие от большинства применяемых триботестеров, используемый тестер обеспечивает высокие нагрузки в зоне трения - до 1000Н.

На образцы в виде блоков было нанесено бронзовое газотермическое покрытие с последующим лазерным модифицированием (лазерное легирование или закалка), а ролики (контртела) - из стали 45 с твердостью 45-51 HRC. Прикладывались постоянные нагрузки 500 Н и 1000 Н при скорости скольжения 0,45 м/с. Временной промежуток для проведения одного испытания – 60 мин. В результате проведенных измерений были зафиксированы значения мгновенных коэффициентов трения и температуры в зоне трения, определялись объемные износы, а также скорости изнашивания. Размеры следов износа измерялись с помощью цифрового микроскопа DinoLite (ANMO Electronics Corporation, New Taipei City, Taiwan) с точностью до 0,001 мм.

Характерные изменения во времени исследуемых параметров приведены на рисунке 1. Зарегистрированные зависимости укладываются в классификацию, предложенную Питер Дж. Блау [3]. Ее автор указал, что существуют различные виды обкатки, приработки и износа за время работы, и предложил восемь типов кривых зависимости силы трения от времени.

Стабилизация коэффициентов трения и температур наблюдалась через ~10 мин работы пары трения независимо от материала поверхностного слоя и технологии его формообразования. Как видно из рисунка 1, при нагрузке 500 Н в течение всего цикла трения значения мгновенного коэффициента трения и температуры в зоне трения очень стабильны. Однако при нагрузке 1000 Н после окончания обкатки наблюдались колебания исследуемых величин, даже на 10-15 % больше средних значений. В этом нет ничего необычного, поскольку подобное явление наблюдалось и во многих других исследованиях.

Подводя итог, можно сделать вывод, что трибологические преобразования могут быть вызваны внешними изменениями условий эксплуатации или происходить спонтанно, без внешних воздействий, в процессе старения трибологической системы. Особенности приработки связаны с общими изменениями силы трения во времени, временем появления характерных явлений в цикле трения и временным уровнем колебаний силы трения, накладывающимся на общую тенденцию трения.

Скорость изнашивания материалов в зависимости от параметров лазерной обработки представлена на рисунке 2. Видно, что влияние скорости перемещения лазерного пятна однозначно, т. е. скорость изнашивания возрастает с увеличением скорости перемещения лазерного пятна с одинаковой интенсивностью, независимо от используемого типа лазерного модифицирования (рисунок 2 а, б, в). Влияние площади лазерного пятна неоднозначно. В случае лазерной закалки и легирования WC увеличение площади лазерного пятна способствует снижению интенсивности изнашивания, в то время как в случае легирования Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> интенсивность

изнашивания возрастает. Можно предположить, что описанные зависимости связаны с особенностями взаимодействия бронзы и карбида при лазерной обработке.

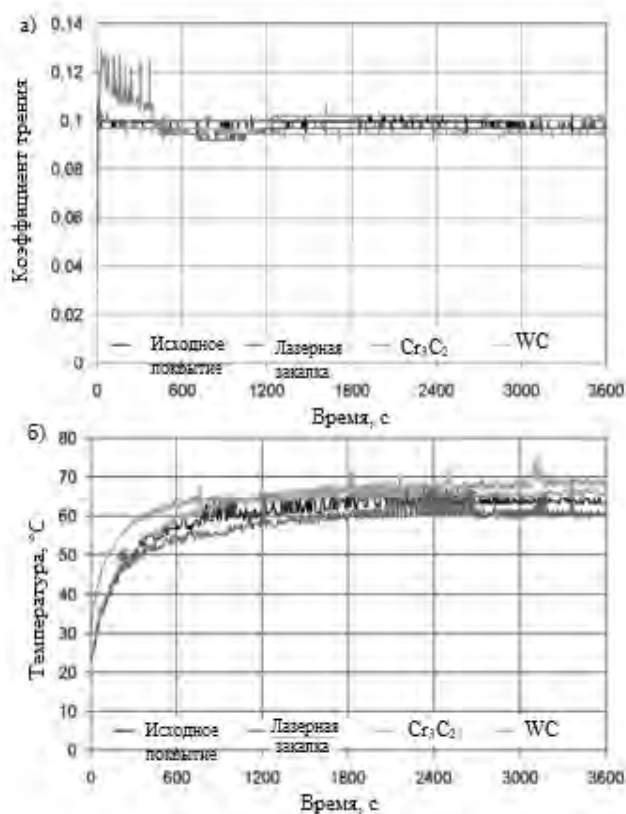


Рисунок 1 – Типичные изменения во времени:  
а – мгновенных коэффициентов трения; б – контактных температур

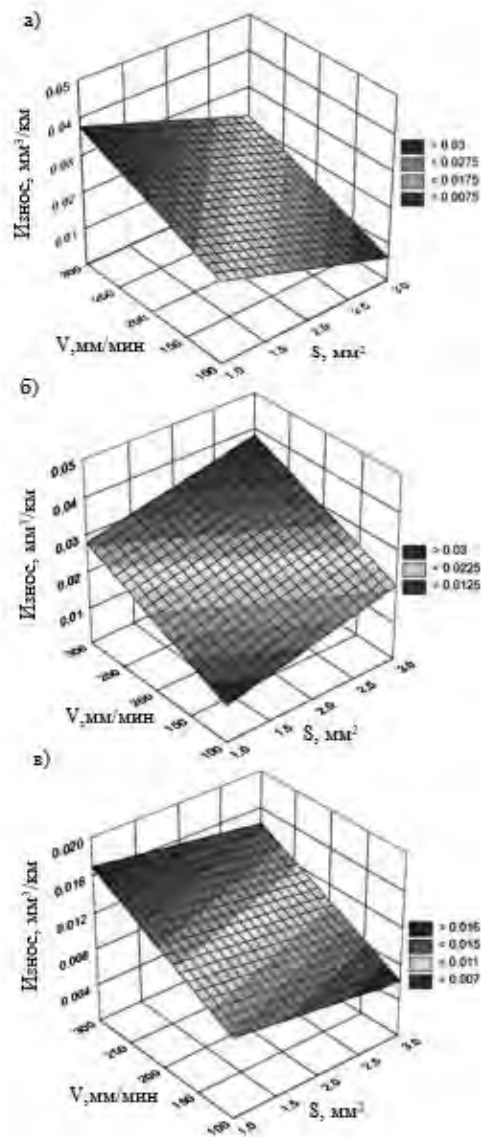


Рисунок 2 – Интенсивность изнашивания в зависимости от параметров лазерной обработки и типа упрочнения: а) лазерная закалка, б) легирование карбидами Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, в) легирование карбидами WC

Полученные результаты интенсивности изнашивания позволяют сделать вывод, об эффективности лазерного модифицирования газотермических покрытий из бронзы

**Заключение:** на основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что в случае лазерной закалки и легирования WC наиболее эффективной оказалась комбинация максимальная площадь пятна – минимальная скорость перемещения лазерного пятна, тогда как в случае легирования Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> минимальная площадь пятна – минимальная скорость перемещения.

Параметры лазерного легирования не оказывают существенного влияния на величину мгновенных коэффициентов трения (0,1 - 0,12). Значение температуры в зоне трения при нагрузке 500 Н стабильно и невелико, но при увеличении нагрузки – 1000Н оно ощутимо возрастает ~130°C.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Болдуева, А. А. Влияние расхода порошка, регулирования температуры поверхности и дистанции напыления бронзы на качество газотермического покрытия под последующее лазерное легирование / А. А. Болдуева, О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, И. М. Косякова // Материалы 18-го Международного научного семинара, проводимого в рамках 20-ой международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике». – Минск: Право и экономика, 2022. – С. 245-247.

2. Болдуева, А. А. Лазерное модифицирование бронзовых плазменных покрытий / А. А. Болдуева, О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, И. М. Косякова // *Материалы 16-го Международного научного семинара, проводимого в рамках 18-ой международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике».* – Минск, 26 марта 2020 г. – С. 209 – 212.

3. Blau, P. J. On the nature of running-in. *Tribology Int* 2005; 38:1007–1012. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.020>. – Date of access: 02.04.2025).

4. Болдуева, А. А. Структура и свойства поверхностных слоев покрытий на основе меди после лазерного модифицирования / А. А. Болдуева, О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, И. М. Косякова // *Материалы 17-го Международного научного семинара, проводимого в рамках 19-ой международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике».* – Минск: Право и экономика, 2021. – 173 -176 С.

5. Девойно, О. Г. Влияние режимов лазерной обработки на структуру упрочненного слоя / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова., И. М. Косякова, А. А. Болдуева, Ю. И. Касач // *Материалы 19-го Международного научного семинара, проводимого в рамках 21-ой международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике».* – Минск: Право и экономика, 2023. – С. 187-190.

УДК 621.78:535.211

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

*канд. техн. наук В. С. Голубев ФТИ НАН Беларуси, г. Минск  
канд. техн. наук, доцент О. В. Дьяченко ФММП БНТУ, г. Минск,  
канд. техн. наук И. И. Вегера ФТИ НАН Беларуси, г. Минск,  
К. В. Протасевич УО «Международный университет МИТСО», г. Минск*

**Резюме.** Изучено поверхностное лазерное легирование стали 95X18 с использованием порошков В<sub>4</sub>С и WС при воздействии излучением иттербиевого волоконного лазера.

**Ключевые слова.** Лазерная обработка, микротвердость, микроструктура.

**Введение.** Традиционные методы получения покрытий из нержавеющей стали фактически исчерпали себя, но промышленность не стоит на месте и появляются новые технологии для улучшения механических и эксплуатационных свойств изделий [1 - 4].

Лазерное легирование позволяет нацелено изменять структуру и свойства поверхности, добавляя легирующие элементы, такие как титан и никель, которые в небольших количествах могут значительно повысить прочность и устойчивость к коррозии. Лазерное легирование представляет собой процесс, при котором легирующие материалы наносятся на поверхность стали под воздействием лазерного излучения [1 – 5].

При введении различных легирующих материалов в процессе лазерной обработки можно существенно изменить эксплуатационные характеристики поверхностного слоя. Например, увеличение твердости и износостойкости может значительно продлить срок службы изделий, что особенно важно в условиях интенсивной эксплуатации.

**Целью работы** является изучение микротвердости и микроструктуры поверхностных слоев стали 95X18 после лазерного модифицирования.

**Методика исследования.** На образцы из стали 95X18 наносились порошковые обмазки на основе В<sub>4</sub>С и WС. Для создания упрочненного слоя применялась лазерная обработка с использованием мощного волоконного лазера. В качестве оборудования использовался модуль поверхностной локальной термообработки МЛ35-ПО, основанный на иттербиевом волоконном лазере с номинальной выходной мощностью 2 кВт и длиной волны излучения 1,06 мкм. Для анализа микроструктуры использовались методы оптической и сканирующей электронной микроскопии (SEM), позволяющие изучить фазовый состав, размер и форму образующихся структур. Рентгеноструктурный анализ (XRD) использовался для определения фазового состава и остаточных напряжений в обработанном слое. Микротвердость измерялась с помощью прибора ПМТ-3.

**Основная часть.** В отличие от традиционных методов химико-термической обработки, лазерное легирование позволяет достигать высокой степени насыщения основного материала легирующими элементами за короткое время и на значительную глубину, обычно не превышающую 1 мм. Это делает процесс более эффективным и экономически выгодным.

Увеличение скорости обработки приводит к быстрой кристаллизации расплавленного металла при лазерном легировании В<sub>4</sub>С и WС образцов из стали 95X18, что приводит к измельчению микроструктуры. Мелкозернистая структура обеспечивает более равномерное распределение напряжений, что в свою очередь повышает общую прочность и долговечность материала (рисунок 1).