

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].

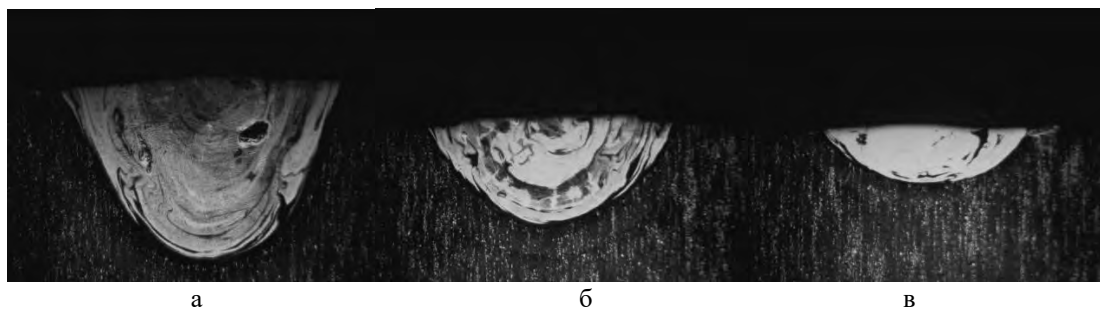
При введении различных легирующих материалов в процессе лазерной обработки можно существенно изменить эксплуатационные характеристики поверхностного слоя. Например, увеличение твердости и износостойкости может значительно продлить срок службы изделий, что особенно важно в условиях интенсивной эксплуатации.

**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).



а - P=2 кВт; v=1 м/мин; б - P=2 кВт; v=2,5 м/мин; в - P=2 кВт; v=5 м/мин

Рисунок 1 – Микроструктура при легировании WC.

Наружный слой, непосредственно подвергшийся воздействию лазерного луча и перешедший в жидкое состояние, обычно демонстрирует сложную кристаллическую структуру. Она может быть дендритной (с древовидными кристаллами), ячеистой (с образованием ячеек из мелких кристаллов) или представлять собой комбинацию этих структур – дендритно-ячеистую. Эта структура характерна для процессов кристаллизации из расплава, что резко отличает ее от мелкозернистой мартенситной структуры, получаемой при закалках в твердой фазе. Формирование конкретного типа структуры зависит от параметров лазерного излучения (мощность, скорость сканирования, длительность импульса), а также от химического состава и предварительной обработки обрабатываемого материала. Например, увеличение скорости сканирования может способствовать формированию более мелкозернистой структуры, в то время как увеличение мощности приводит к образованию более выраженных дендритов.

Под наружным слоем располагается зона термического влияния (ЗТВ). В этой области материал не плавится, но подвергается значительному нагреву. В зависимости от исходной структуры материала и параметров обработки, в ЗТВ могут происходить различные фазовые превращения, такие как рекристаллизация, а также процессы диффузии легирующих элементов. Часто в ЗТВ наблюдается подзакалка стали, увеличивающая ее прочность, но и повышающая хрупкость, что требует тщательного подбора режимов обработки.

Анализ микроструктуры оплавленной зоны часто выявляет неоднородности в распределении легирующих элементов и фаз. Наблюдаемые «вихри» и «языки» с различной степенью травимости свидетельствуют о неравномерном распределении концентрации легирующих элементов и образовании различных фаз.

Исследование показало, что при определенных параметрах лазерной обработки стали, а именно при заданных временах существования ванны расплава и скорости конвекции, не удастся достичь однородной структуры зоны оплавления. Это характерно для случаев лазерного легирования, когда на поверхность стали наносится легирующий материал, например, карбиды вольфрама (WC) или бора (B<sub>4</sub>C). Лазерное оплавление без легирования, независимо от параметров лазерного излучения, приводит к однородной структуре зоны оплавления.

Глубина легированного слоя зависит от мощности лазерного излучения. При мощности 1 кВт глубина проплавления составляет около 350 мкм, а при мощности 2 кВт – около 600 мкм. Зона мартенситно-аустенитных превращений, возникающая в результате термической обработки, достигает 200-250 мкм при мощности 1 кВт и 300-350 мкм при мощности 2 кВт. Увеличение мощности лазерного излучения приводит к увеличению объема расплавленного металла, что проявляется в росте, как глубины, так и ширины расплавленной дорожки. При диаметре пятна фокусировки около 1,5 мм и мощности 2 кВт ширина дорожки достигает 2,5-3 мм. Важно отметить, что распределение энергии в пятне фокусировки также влияет на формирование структуры. Неравномерность распределения энергии может усиливать неоднородность структуры легированного слоя.

Микротвердость легированного слоя также зависит от мощности лазерного излучения и от скорости лазерного луча.

Анализ рисунков 2 и 3 демонстрирует критическую зависимость эффективности лазерного легирования от параметров лазерного излучения. Оптимальные результаты, выражающиеся в максимальном повышении микротвердости поверхностного слоя до 14 ГПа (что эквивалентно 75 HRC по шкале Роквелла), достигаются при мощности лазера 2 кВт и скорости обработки 2,5 м/мин (рисунок 2, кривая 2). Микротвердость снижается при увеличении глубины легированного слоя (рисунок 2, кривая 1). Это явление объясняется уменьшением концентрации легирующих элементов по мере удаления от поверхности. Важно отметить, что указанное значение микротвердости (14 ГПа) значительно превышено. Вероятно, имелась в виду микротвердость в диапазоне 8,5 – 12 ГПа, что соответствует значениям, типичным для поверхностного легирования сталей.

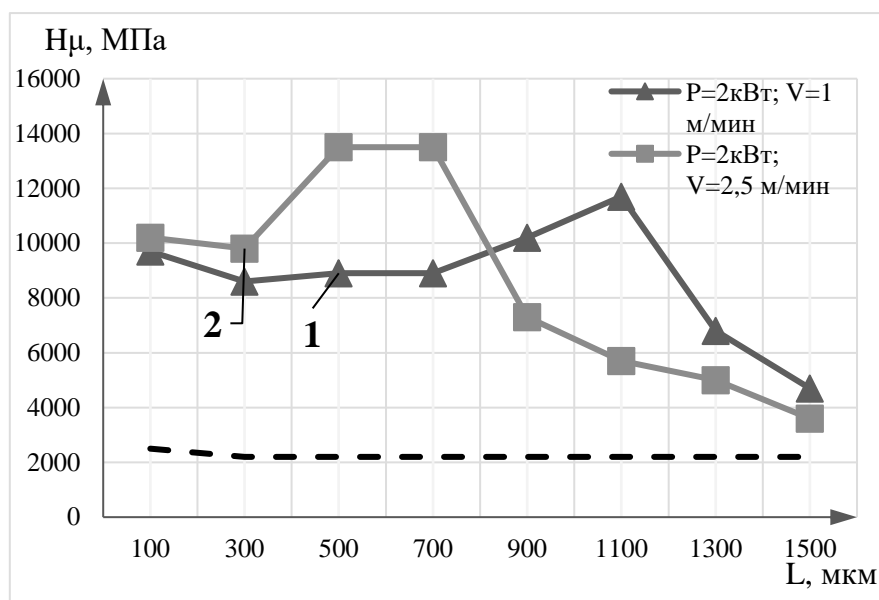


Рисунок 2 – Зависимость микротвердости по глубине слоя при лазерном легировании поверхности стали 95X18 с использованием В<sub>4</sub>С

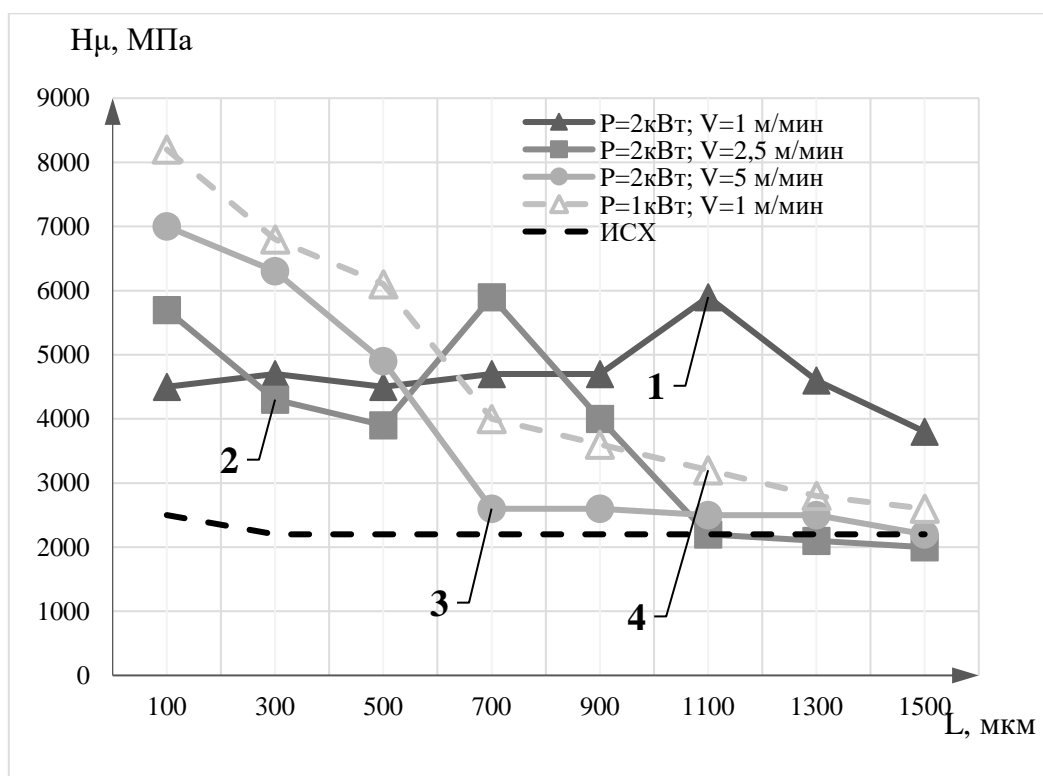


Рисунок 3 – Зависимость микротвердости стали 95X18 при легировании WC

**Заключение.** Полученные результаты демонстрируют прямую корреляцию между плотностью мощности лазерного излучения и глубиной легированного слоя. При мощности 1 кВт глубина легирования достигала ~350 мкм, а при увеличении мощности до 2 кВт – ~600 мкм. Важно отметить, что глубина зоны мартенситно-аустенитных превращений, являющаяся следствием термоциклического воздействия лазера, также возрастала: от 200-250 мкм при 1 кВт до 300-350 мкм при 2 кВт. Это указывает на значительные изменения микроструктуры стали в объеме, превышающем глубину легированного слоя. Мартенситно-аустенитные превращения способны значительно повысить твердость и износостойкость поверхности, но одновременно могут снизить пластичность и ударную вязкость. Поэтому важен оптимальный выбор параметров лазерной обработки.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бернацкий, А. В. Лазерное поверхностное легирование стальных изделий (Обзор) / А. В. Бернацкий // Автоматическая сварка. – 2013, №. 12. – С. 3 – 10.

2. Кардаполова, М. А. Особенности влияния параметров лазерной обработки на физико-механические свойства покрытий из сплавов на основе железа / М. А. Кардаполова, О. Г. Девойно, О. В. Дьяченко / Машиностроение-традиции и инновации: сборник трудов Всерос. молод. конф. 30 августа-1 сентября / Юргинский техн. институт. – Томск: Изд-во Томского политех. Университета. 2011. С. 200-204

3. Голубев, В. С. Лазерная обработка материалов с изменением химического состава поверхностного слоя. / В. С. Голубев, И. И. Вегера, О. Чернашеюс, В. В. Чаевский. / Вестник БарГУ, сер. Технические науки – 2019, Т. 7. – С. 34-42.

4. Астапчик, С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. – Минск: Белорусская наука, 2008. – 252 с.

5. Голубев, В. С. Поверхностное легирование стали HARDOX 600 с использованием волоконного лазера / В. С. Голубев, И. И. Вегера, В. Е. Ходюш, О. В. Дьяченко, К. В. Протасевич / Современные методы и технологии создания и обработки материалов/ ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, 2023. – С. 72 – 84.

УДК 669.15.194.55:621.785.5

## **ВЫБОР КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ВЛИЯНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ**

*канд. техн. наук, доцент О. В. Дьяченко, ФММП БНТУ, г. Минск,  
канд. техн. наук, доцент М. А. Кардаполова, С. М. Криуша, МСФ БНТУ, г. Минск,*

**Резюме.** Изучено влияние параметров лазерного легирования и легирующих компонентов на формирование поверхностного слоя стальных изделий. Обоснован выбор компонентов для лазерного легирования. Изучено влияние состава легирующих компонентов на микротвердость поверхностного слоя стальных изделий. Изучено влияние состава выбранных компонентов на трибологические характеристики поверхностного слоя.

**Ключевые слова:** лазерное легирование, стальные изделия, микротвердость.

**Введение.** Существующие в настоящее время ряд технологических методов восстановления-упрочнения изношенных деталей машин обеспечивает получение высокого уровня физико-механических и эксплуатационных свойств рабочих поверхностей. Известен способ газопламенного нанесения компонентов на основе меди, никеля и кобальта [1, 2]. Данный способ является дорогостоящим. Применение комплексного лазерного легирования стальных изделий является наиболее перспективным методом, позволяющим получить поверхности с гарантированным набором свойств [3 – 5].

**Методика исследования.** На образцы из сталей 30 ГОСТ 1050-88, 20 ГОСТ 1050-88, 10 ГОСТ 1050-2013 и сталь 3 ГОСТ 380-2005 диаметром 40 мм и толщиной 20 мм наносили порошковые покрытия из оксида хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$  в виде обмазок. Чтобы слой легирующих элементов имел нужную механическую прочность, в состав добавили 3 % раствор нитроцеллюлозного клея на ацетоне до получения пастообразной массы. Приготовленные образцы с нанесенным легирующим составом подвергли воздействию лазерного излучения непрерывного действия мощностью 800 Вт.

Плотность мощности излучения составила  $1,8^9 \text{Вт/м}^2$  при скорости перемещения луча лазера относительно поверхности образцов 315 мм/мин. Толщина легированного слоя составила 100-150 мкм. Микротвердость измерили с помощью цифрового твердомера HVS-1000AT. Исследования структуры и химического состава материалов проводили с использованием металлографического комплекса ADF 1350.

**Основная часть.** Испытания износостойкости легированных поверхностей проводили с помощью машины торцового трения. В качестве контртела использовали трубку из твердого сплава ВК 6. Величина износа определили по глубине образовавшейся канавки с помощью профилографа-профилометра модели 252.

**Целью** работы является выбор компонентов для лазерного легирования, повышающих микротвердость и уменьшающих износ стальных изделий.

Использование в легирующем покрытии оксида хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$  обеспечивает образование в поверхностном слое после лазерной обработки легированных хромом карбидов и боридов железа [3 – 5]. Под действием высоких температур и избыточного давления лазерного излучения в зоне обработки эти соединения распадаются с образованием активных атомов бора, углерода и хрома, которые диффундируют в стальную поверхность, взаимодействуют с атомами железа и друг с другом. Карбид бора является также и активным восстановителем хрома из оксида с образованием газообразных соединений углерода с кислородом, выделение которых фиксируется в результате эксперимента и является доказательством протекания восстановительной реакции [3 – 5].

Таким образом, структура легированного слоя после обработки лазерным излучением состоит из  $\alpha$ -твердого раствора хрома и бора в железе с включением сложных боридов типа  $(\text{Cr}, \text{Fe})_2$  и  $(\text{Cr}, \text{Fe})$ , а также вторичных карбидов типа MC. Отсюда можно сделать вывод, что введение хрома и бора необходимо в первую очередь для образования в слое легированных хромом боридов железа, а во вторую для легирования твердого раствора.

Провели испытания микротвердости и износостойкости образцов из низкоуглеродистых сталей 3, 10, 20, 30 с различным содержанием легирующих веществ – повышенным содержанием хрома 85 – 90 %, с содержанием