

# Восстановление поверхности выпускного клапана методом плазменного напыления в сравнении с электродуговым и газопламенными методами

Д. И. БАЛАХОНОВ, И. А. МАКАРОВ, М. В. ЯРАНЦЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО «ДВГУПС»), Хабаровск, 680021, Россия

**Аннотация.** В условиях современной экономической нестабильности различных секторов промышленности для народно-хозяйственного комплекса важным является вопрос улучшения технологии ремонта деталей силовых агрегатов, при этом разработка технологических приемов по восстановлению контактных поверхностей деталей должна производиться в условиях предприятий и быть доступной. В статье сравниваются наиболее распространенные методы восстановления поверхности деталей, такие как газопламенное, плазменное напыление и электродуговая наплавка. Изученный опыт различных специалистов, работающих в данном направлении, позволил реализовать эти методы восстановления с применением шихты на основе минерального вольфрамоносителя, бора и углерода. Исследован процесс легирования получаемых покрытий, где вольфрам имеет форму триоксида вольфрама ( $WO_3$ ) и вольфрамата кальция ( $CaWO_4$ ). Произведен сравнительный анализ методов восстановления поверхности конуса выпускного клапана дизельного двигателя Д49. Приведены результаты микро- и макроанализа структур полученных покрытий и основного металла восстанавливаемой детали, результаты анализа химического состава, оценка микротвердости и адгезионной прочности сцепления полученных покрытий с поверхностью основного металла. Обоснована перспективность применения методов газотермического восстановления поверхности деталей по отношению к методу электродуговой наплавки. Последующие исследования будут направлены на установку восстановленных деталей в двигатель внутреннего сгорания локомотива, их эксплуатацию в реальных условиях, оценку надежности и долговечности. Исследования в данном направлении позволят улучшить качественные показатели восстановленных поверхностей деталей силовых агрегатов подвижного состава.

**Ключевые слова:** клапан дизеля Д49; восстановление поверхности; газотермическое напыление; газопламенное напыление; электродуговая наплавка; плазменное напыление; шеелитовый концентрат

**Введение.** Основными требованиями, предъявляемыми к современным дизельным двигателям тягового подвижного состава, являются повышенная надежность и работоспособность при различных режимах работы в условиях высокой термической и динамической нагрузки на детали [1, 2].

Поддержание в исправном состоянии всех элементов шатунно-поршневой группы и газораспреде-

лительного тракта двигателя с соблюдением всех технологических размеров и допусков — первостепенная задача, решаемая в циклах технического обслуживания и ремонта. Каждая деталь из указанных групп имеет свои нормы межремонтного пробега и до полной выработки положенного ресурса может потребовать непланового ремонта.

На данный момент применяемые при деповском ремонте методы восстановления поверхностей деталей двигателя внутреннего сгорания не позволяют достичь изначального уровня качества, что приводит к снижению как надежности, так и долговечности всего механизма.

Подобного рода проблемы могут быть нивелированы или решены полностью с применением более современного технологического подхода к вопросу ремонта [3–8]. Одним из таких подходов является применение плазменного напыления [9] для локального нанесения специального состава на основе минеральных компонентов при восстановлении контактных поверхностей деталей.

Результаты экспериментов по восстановлению поверхности запорного конуса выпускного клапана тепловозного дизельного двигателя Д49 позволяют провести сравнительный микро- и макроанализ плазменного напыления и применяемых на сегодняшний день методов восстановления, таких как автоматическая электродуговая наплавка и газопламенное напыление.

Основным критерием для оценки качества покрытия является его адгезионная прочность  $\tau_0$  относительно поверхности напыляемой детали. В свою очередь, данный показатель для электродугового и газопламенного методов напыления лежит в пределах от 20 до 50 МПа. В случае применения плазменного метода напыления показатель адгезии должен составлять от 30 до 60 МПа [10].

Процессы восстановления поверхностей деталей двигателей внутреннего сгорания широко известны и представлены во многих работах [3, 4, 6, 11–13]. Результаты экспериментов показывают перспективность

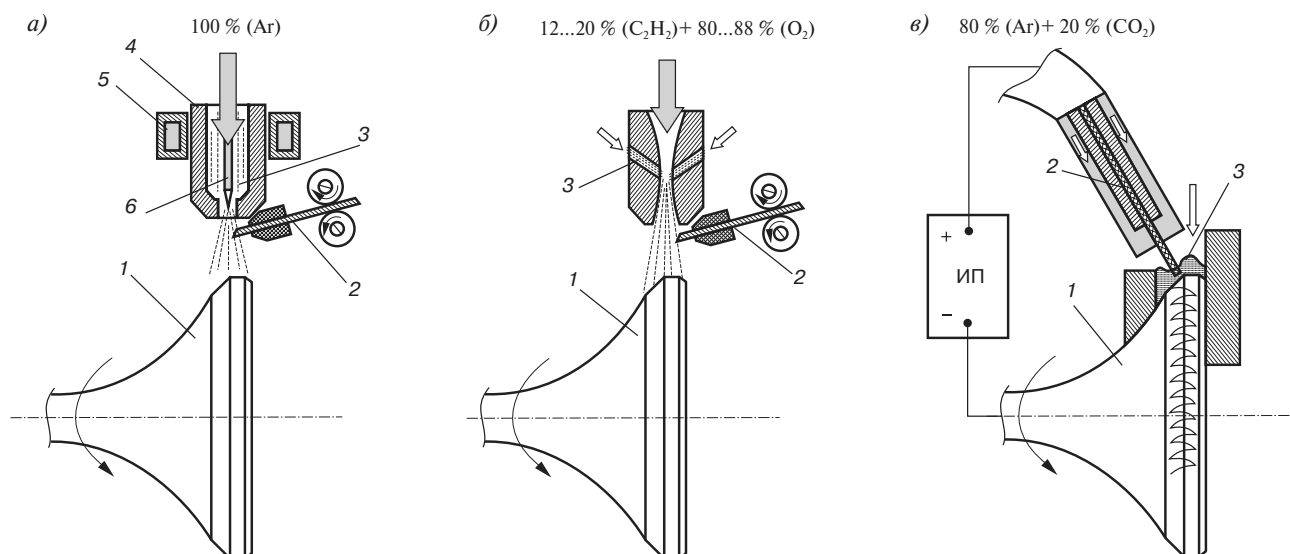


Рис. 1. Схема восстановления пояса запорного конуса клапана:  
*а* — плазменное напыление: 1 — клапан; 2 — подача проволоки; 3 — подача шихты; 4 — анод; 5 — система охлаждения; 6 — катод;  
*б* — газопламенное напыление; *в* — электродуговая наплавка: 1 — клапан; 2 — подача проволоки; 3 — подача шихты.

ИП — импульсный преобразователь

Fig. 1. Reconstruction of the valve closure cone course:

*a* — plasma spraying: 1 — valve; 2 — wire feed; 3 — batch routing; 4 — anode; 5 — cooling system; 6 — cathode;  
*б* — flame spraying; *в* — electric arc surfacing: 1 — valve; 2 — wire feed; 3 — batch routing.

ИП — pulse converter

подобных решений, а также позволяют проанализировать некоторые возможные недостатки, к которым зачастую относятся: шлакообразование, перегрев детали, низкий показатель адгезии, разнородность материала по отношению к основанию и т. д.

**Методика и материалы.** Для обоснования перспективности применения методов газотермического восстановления поверхности деталей по отношению к методу электродуговой наплавки приведены результаты экспериментов, проводимых с ремонтпригодными выпускными клапанами дизельного двигателя Д49, эксплуатируемого на магистральном локомотиве серии 2ТЭ10МК. Схематически методы восстановления поверхности запорного конуса клапана представлены на рис. 1. Рассматриваемые газотермические методы напыления имеют принципиальные отличия от электродуговой наплавки при ремонте деталей подвижного состава. Важно отметить, что для достижения наилучшего показателя адгезионной прочности покрытия к поверхности подложки необходимо учитывать температуру процесса, давление (скорость движения частиц при газотермических методах) и время взаимодействия частиц с подложкой.

Для нанесения покрытия указанными методами клапан был предварительно отчищен от нагара, измерена геометрия запорного конуса и величина биения клапана с последующей механической обработкой. Восстанавливаемые поверхности перед нанесением покрытия были обезжирены. Стержень

клапана установлен в патрон токарного станка, в устройстве для поперечной подачи режущего инструмента закреплен механизм установки и дистанцирования горелки — держак.

Режим вращения детали для каждого метода нанесения покрытия подобран экспериментально. Так, для электродуговой наплавки частота вращения не превышала 10 об/мин, а для методов плазменного и газопламенного напыления составляла до 1000 об/мин. Для более точного регулирования частоты вращения применялся импульсный преобразователь.

Выпускной клапан изготовлен из жаропрочной высоколегированной стали, химический состав которой согласно справочным материалам и предварительной проверке на соответствие сведен в табл. 1. Важно отметить, что при производстве клапанов для дизельных двигателей Д49 используется сталь жаропрочная, высоколегированная различных марок, например 45Х14Н14В2М, 40Х10С2М и др. Различия в составе сталей заключаются в наличии таких химических элементов, как W, Ti, Cu и др.

Определение показателя адгезионной прочности сцепления полученных покрытий с поверхностью основного металла производилось стандартным методом на сдвиг с применением цилиндрического пуансона и матрицы.

Пористость полученных покрытий определяли методом гидростатического взвешивания. Анализ микротвердости производился с использованием сертифицированного оборудования ПМТ-3 по методу

Таблица 1

Химический состав стали выпускного клапана и сварочно-наплавочной проволоки, содержание в масс. %

Table 1

Chemical composition of the steel of the outlet valve and welding-surfacing wire, content in mass. %

| Химические элементы | Марка стали  |                                     |
|---------------------|--------------|-------------------------------------|
|                     | 45X14H14B2M  | 12X18H10T<br>(проволока $D = 2$ мм) |
| C                   | 0,4...0,5    | 0,12                                |
| Si                  | до 0,8       | 0,8                                 |
| Mn                  | до 0,7       | 2                                   |
| Ni                  | 13...15      | 11                                  |
| S                   | до 0,02      | 0,02                                |
| P                   | до 0,035     | 0,035                               |
| Cr                  | 13...15      | 19                                  |
| Mo                  | 0,25...0,4   | —                                   |
| Ti                  | —            | 1                                   |
| Cu                  | —            | 0,3                                 |
| W                   | 2,0...2,8    | —                                   |
| Fe                  | 64,75...69,8 | 67                                  |

Виккерса при нагрузке  $F = 50$  кгс и времени выдержки 10...15 с. Значение микротвердости для стали марки 45X14H14B2M составляли 285...290 HV.

Химический анализ полученных покрытий производился с применением сертифицированного лабораторного искрового оптико-эмиссионного спектрометра фирмы Hitachi High-Tech модели Foundry-Master Smart с диапазоном длин волн 165...700 нм.

Общеизвестно, что наличие вольфрама в составе стали приводит к повышению показателя твердости и красностойкости сплава. Наличие этого элемента при восстановлении поверхности пояска обязательно, так как вольфрам входит в состав основного металла клапана. Также важно учитывать содержание остальных химических элементов, входящих в состав стали, применяемой для восстановления.

Электродуговая наплавка, газопламенное и плазменное напыление производились с автоматиче-

ской подачей проволоки в высокотемпературную зону. Важно отметить, что для восстановления поверхности запорного конуса выпускного клапана сложно подобрать готовое решение по сварочно-наплавочной проволоке, так как существующий на рынке ассортимент имеет существенные отличия по химическому составу в сравнении с составом стали клапана. Ввиду этого было принято решение дополнительно производить ввод шихты в процессе наплавки и напыления. Для указанных технологических процессов применялась проволока марки 12X18H10T диаметром 2 мм с досыпкой шихты разработанного состава, включающего в том числе шеелитовый концентрат (табл. 2).

Процесс подготовки шихты сопровождался ее механоактивацией при смешивании трех компонентов в следующем соотношении: концентрат — 50...90 %, бор — 10...50 % и углерод (графит) — 5...10 %. Размер фракции составлял 100...350 мкм.

**Восстановление поверхности выпускного клапана методом электродуговой наплавки.** В ходе электродуговой наплавки восстановленная поверхность клапана поэтапно претерпевала следующие операции: нормализацию с последующим остыванием на воздухе, зачистку поверхности, отделение сегментов и подготовку шлифов с последующим травлением исследуемой поверхности (рис. 2).

Скорость вращения восстанавливаемой детали в процессе наплавки составляла 8...10 об/мин, ток дуги 84 А, температура детали в процессе наплавки достигала 550...680 °С и контролировалась пирометром. Важно отметить, что нагрев детали неравномерен и указанные значения справедливы только для зоны контакта дуги.

Электродуговую наплавку производили проволокой марки 12X18H10T с добавлением шихты на основе шеелитового концентрата. Высокотемпературная зона наплавки защищалась газовой смесью 80 % Ag и 20 % CO<sub>2</sub>. Такое условие необходимо для стабилизации процессов перехода легирующих элементов из шихты в получаемое покрытие.

Проведенный микроанализ шлифа (рис. 2, а) показал наличие четко выраженной границы раздела фаз основного металла поверхности клапана и наплавляемого слоя (рис. 2, б). Выявлены отдельные образования

Таблица 2

Фазовый состав шеелитового концентрата

Table 2

Phase composition of scheelite concentrate

| Содержание химических соединений в концентрате, масс. % |                                |                                |      |      |      |      |                   |                  |                               |      |                  |                 |                 |                               |                               |                 |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| SiO <sub>2</sub>                                        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO  | MnO  | CaO  | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | As   | TiO <sub>2</sub> | WO <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | H <sub>2</sub> O <sup>-</sup> | H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> | CO <sub>2</sub> |
| 7,96                                                    | 0,78                           | 5,29                           | 0,72 | 0,02 | 19,8 | 2,45 | 0,18              | 0,17             | 4,9                           | 0,45 | 0,25             | 55,4            | 0,1             | 0,48                          | 0,62                          | 0,43            |

Таблица 3

Химический состав покрытия и основного металла выпускного клапана после электродуговой наплавки

Table 3

Chemical composition of the coating and base metal of the outlet valve after arc weld

| Спектр | Химические элементы, масс. % |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |       |
|--------|------------------------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|        | C                            | Si   | Mn   | Ni    | S    | P    | Cr   | Mo   | Ti   | Cu   | W    | Fe    |
| 1      | 0,43                         | 0,4  | 0,5  | 11    | 0,01 | 0,02 | 12   | 0,4  | —    | —    | 2,25 | 72,99 |
| 2      | 0,47                         | 0,2  | 0,48 | 10,24 | 0,01 | 0,01 | 11,2 | 0,34 | —    | —    | 2,16 | 74,89 |
| 3      | 0,33                         | 1,66 | 0,43 | 9,54  | 0,02 | 0,01 | 8,64 | 0,21 | —    | 0,01 | 3,41 | 75,74 |
| 4      | 0,41                         | 0,98 | 0,47 | 8,85  | 0,02 | 0,01 | 8,96 | 0,4  | 0,01 | 0,01 | 3,25 | 76,63 |
| 5      | 0,46                         | 1,22 | 0,43 | 9,76  | 0,01 | —    | 9,54 | —    | 0,01 | —    | 2,93 | 75,64 |

основного металла в наплавленном слое, шлаковые включения и поры.

Глубина перехода и проплавления поверхности клапана в среднем составила 800 мкм и зависела от скорости и времени процесса наплавки.

Общее наличие пор в полученном покрытии составило 3...11 %, что может свидетельствовать о недостаточной защите поверхности при наплавке в смеси газов  $Ag + CO_2$ , увеличенной скорости процесса наплавки, недостаточном или избыточном содержании бора и углерода в шихте. Такие показатели пористости получены в результате использования экспериментально подобранного состава шихты (10 % — бор, 10 % — углерод, остальное — шеелитовый концентрат) и снижения скорости вращения клапана, что, в свою очередь, приводит к увеличению нагрева детали и снижению качественных характеристик стали.

Анализ химического состава наплавленного слоя и основного металла клапана представлен в табл. 3. Спектры 1 и 4 соответствуют основному металлу клапана, спектры 2 и 5 — покрытию, спектр 3 получен на границе раздела фаз.

Химический анализ показал, что состав основного металла клапана остается преимущественно прежним, а при приближении к границе раздела фаз изменяется. Содержание углерода в основном металле составляет в среднем 0,42 масс. %, на границе раздела фаз — 0,33 масс. %, в покрытии — 0,46 масс. %. В процессе эксперимента удалось достичь содержания вольфрама в наплавленном слое 2,16...2,93 масс. %. Микротвердость наплавленного слоя составила 310 HV (получено при нагрузке  $F = 50$  кгс и времени выдержки 10...15 с), микротвердость основания — 290 HV по Виккерсу. Проведенный анализ адгезионной прочности покрытия к основному металлу показал значение в 370 МПа, разрушение происходило не по границе раздела фаз, а в сторону основного металла.

Важно отметить, что в процессе восстановления выпускного клапана сложно избежать термических деформаций (рис. 2, а), приводящих к напряжению в покрытии и у границ раздела фаз, а также выгибанию тарелки клапана.

Дальнейшее использование клапана после электродуговой наплавки может быть нецелесообразным

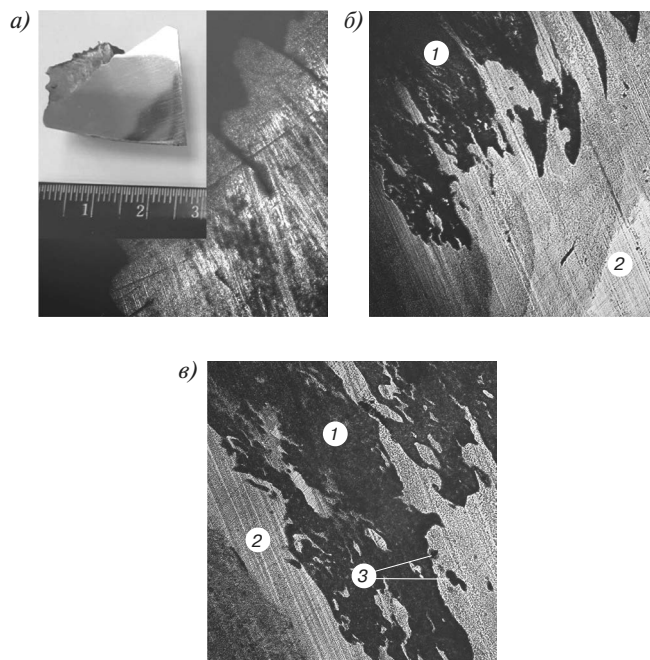


Рис. 2. Область электродуговой наплавки на поверхности выпускного клапана: а — наплавленный слой на поверхности клапана; б — граница основного металла и наплавленного слоя; в — граница раздела фаз и дефекты в структуре металла: 1 — наплавленный слой; 2 — основной металл; 3 — шлаковые включения

Fig. 2. Arc weld area on the surface of the outlet valve: а — weld layer on the valve surface; б — boundary of the base metal and the weld layer; в — phase boundary and defects in the metal structure: 1 — weld layer; 2 — base metal; 3 — slag inclusions

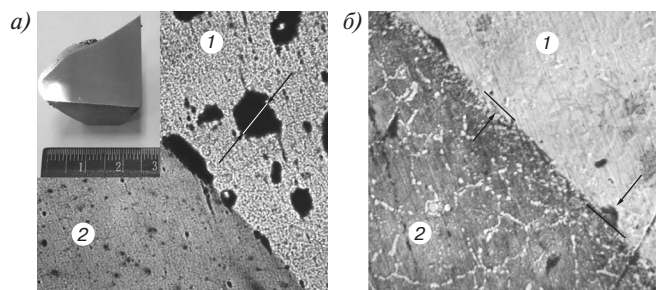


Рис. 3. Области газопламенного напыления на поверхности выпускного клапана:  
а — образец микрошлифа и напыленный слой;  
б — проплавление поверхности клапана:  
1 — напыленный слой; 2 — основной металл

Fig. 3. Flame spraying areas on the surface of the outlet valve:  
а — microsection sample and sprayed layer;  
б — weld penetration of the valve surface:  
1 — sprayed layer; 2 — base metal

ввиду наличия большого количества как внутренних, так и внешних дефектов (микротрещин, пор, шлаковых включений).

**Восстановление поверхности выпускного клапана методом газопламенного напыления.** Значительным отличием при восстановлении поверхности детали методом газопламенного напыления является скорость вращения детали — 800...1000 об/мин. Высокотемпературная среда факела ацетилено-кислородной горелки позволяет производить расплавление вводимой проволоки марки 12Х18Н10Т и шихты с последующим ее диспергированием на восстанавливаемую поверхность клапана. Расход газовой смеси в процессе напыления подбирался экспериментально и составил: ацетилен — 0,05...0,08 м<sup>3</sup>/ч, кислород — 0,2...0,6 м<sup>3</sup>/ч. Вместо ацетилена в качестве горючего газа можно применять пропан-бутановую смесь, но расход газа в таком случае будет отличаться от указанного. Диаметр сопла горелки для ацетилено-кислородной смеси — 2,8 мм, шихта подавалась

совместно с газом по технологическому каналу в предопловую зону. Температура факела составляла 3000 °С, температура самой детали достигала 300...400 °С и контролировалась прерыванием процесса и постепенным охлаждением до 150...250 °С. Толщина напыляемого слоя на поверхности запорного конуса клапана распределялась неравномерно и составила 2...3 мм.

Анализ микроструктуры шлифа, полученного в результате газопламенного напыления, представлен на рис. 3. Различима граница полученного покрытия и основного металла (рис. 3). Проплавление поверхности основного металла клапана составило 10...30 мкм, различимы поры и очаги шлака. Переход металла подложки в покрытие — не более 20 мкм. Общее количество пор наплавленного слоя составляло в среднем 21 %, размер пор достигал 400 мкм. Причиной порообразования является наличие попутных химических элементов, входящих в состав концентрата и шихты (соединения с кислородом, участвующие в металлургических реакциях), перепад температур между подложкой (поверхностью детали) и расплавом, а также температурный градиент при остывании покрытия, снижение текучести.

На макроснимке микрошлифа (рис. 3, а) можно заметить, что объем пор по всей глубине полученного покрытия значителен, так как прогрев детали происходит неравномерно из-за теплопередачи по всему объему клапана.

Существует ряд технологических приемов, позволяющих снизить порообразование (например, не уводить факел горелки по окончании процесса напыления). Однако при этом существует риск перегрева как самой детали, так и получаемого покрытия.

Показатель адгезионной прочности сцепления с покрытием составил 43 МПа. Химический состав материала покрытия и основного металла клапана представлен в табл. 4.

Таблица 4

Химический состав покрытия и основного металла выпускного клапана после газопламенного напыления

Table 4

Chemical composition of the coating and base metal of the outlet valve after flame spraying

| Спектр | Химические элементы, масс. % |      |      |       |      |   |       |      |    |    |      |       |
|--------|------------------------------|------|------|-------|------|---|-------|------|----|----|------|-------|
|        | C                            | Si   | Mn   | Ni    | S    | P | Cr    | Mo   | Ti | Cu | W    | Fe    |
| 1      | 0,42                         | 0,11 | 0,24 | 13,12 | 0,02 | — | 13,94 | 0,26 | —  | —  | 2,3  | 69,59 |
| 2      | 0,41                         | 0,16 | 0,31 | 8,67  | 0,01 | — | 12,26 | 0,11 | —  | —  | 4,43 | 73,64 |
| 3      | 0,39                         | 0,59 | 0,37 | 8,45  | 0,01 | — | 9,72  | 0,18 | —  | —  | 6,65 | 73,64 |
| 4      | 0,44                         | 0,2  | 0,32 | 13,22 | 0,01 | — | 13,98 | 0,28 | —  | —  | 2,2  | 69,35 |
| 5      | 0,38                         | 0,47 | 0,19 | 9,04  | 0,01 | — | 11,64 | 0,01 | —  | —  | 6,13 | 72,13 |

При анализе данных таблицы можно заметить, что состав основного металла клапана остается преимущественно прежним (спектры 1 и 4), а его показатели изменяются при приближении к границе раздела фаз (спектр 2).

Содержание углерода у границы раздела фаз составляет 0,41 масс. %, в покрытии — 0,38...0,39 масс. % (спектры 3 и 5). Содержание вольфрама на границе раздела — 4,43 масс. %, в покрытии — 6,13...6,65 масс. %. Выявлен переход вольфрама в сплав в карбидную форму WC, а также наличие вкраплений отдельной фазы вольфрама в соединении с кислородом (выпадающая фаза). Микротвердость полученного покрытия — 420...480 HV (получено при нагрузке  $F=50$  кгс и времени выдержки 10...15 с), микротвердость основания — 285...290 HV.

В отличие от электродуговой наплавки в процессе высокотемпературного воздействия факелом горелки деформации тарелки клапана не происходит. Увеличивать толщину наносимого слоя методом газопламенного напыления на запорный конус клапана крайне затратно (расход материала, не достигающего поверхности детали, составляет 70 %). Уменьшить расход материала возможно путем изменения диаметра и формы сопла, что также позволит сконцентрировать факел горелки и уменьшит диаметр зоны покрытия.

**Восстановление поверхности выпускного клапана методом плазменного напыления.** При восстановлении поверхности детали методом плазменного напыления температура факела достигает 10000 °С. Удельная мощность плазменного факела составляет 104...105 Вт/см<sup>2</sup>, скорость вращения детали — не менее 1000 об/мин. Температурный градиент плазменного факела неравномерный, а максимальный показатель температуры снижается от центра потока и соплового отверстия. Благодаря конструктивным особенностям плазматрона, разработанного на базе аппарата плазменной резки (рис. 1, а), шихта вводилась в предсопловую область под высоким давлением. Обусловлено это тем, что применяемый в экспериментах плазматрон косвенного действия имеет в своей конструкции и анодную, и катодную части. Также в плазменный поток вводилась проволока марки 12Х18Н10Т. Частицы расплавленного материала, с высокой скоростью направленные на поверхность клапана, позволили сформировать покрытие толщиной 1,0...2,5 мм. Расход газа (аргон) в процессе напыления составил 1,5...1,98 м<sup>3</sup>/ч. Сопло диаметром 1,2 мм являлось анодом плазматрона и принудительно охлаждалось. Катод плазматрона выполнен из вольфрамового стержня диаметром 3 мм. Температура детали в процессе напыления достигала 380...550 °С и контролировалась преры-

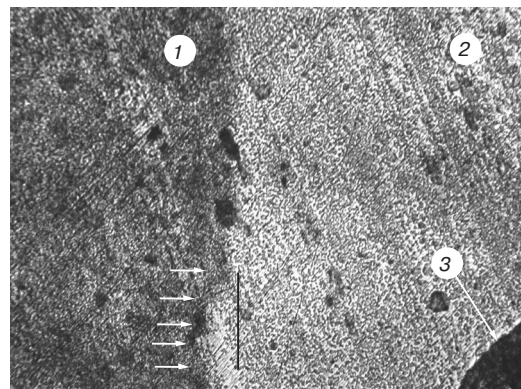


Рис. 4. Область плазменного напыления на поверхности выпускного клапана:  
1 — основной металл; 2 — напыленный слой;  
3 — пора и шлаковые включения

Fig. 4. Plasma spraying area on the surface of the outlet valve:  
1 — base metal; 2 — sprayed layer;  
3 — time and slag inclusions

ванием процесса и постепенным охлаждением до 150...250 °С.

Проплавление поверхности основного металла клапана составило 10...50 мкм, различимы поры и очаги шлака. Глубина перехода металла подложки в покрытие — не более 30 мкм. Общее количество пор наплавленного слоя составило в среднем 4 %, размер пор достигал 350 мкм.

Микроструктура полученного покрытия и основного металла представлена на рис. 4. Граница покрытия и основного металла клапана менее различима по сравнению с вышеперечисленными методами восстановления поверхности.

При восстановлении поверхности клапана методом плазменного напыления важную роль играет форма факела и принцип подачи напыляемого материала в высокотемпературную зону. Материал в поле плазмы претерпевает следующие преобразования: плавление, диспергирование и возгонку. На выходе из потока плазмы расплавленные капли соударяются с поверхностью детали, что приводит к диффузии с основным металлом. Основной задачей, решаемой благодаря применению плазменного напыления, является использование тугоплавкого металла (вольфрама), входящего в состав шеелитового концентрата.

Анализируя данные таблицы 5, можно заметить, что состав основного металла клапана остается преимущественно прежним (ему соответствуют спектры 1 и 4), а его показатели изменяются при приближении к границе раздела фаз (спектр 2).

Содержание углерода у границы раздела фаз составляет 0,31 масс. %, в покрытии — 0,27...0,29 масс. %

Таблица 5

Химический состав покрытия и основного металла выпускного клапана после плазменного напыления

Table 5

Chemical composition of the coating and base metal of the outlet valve after plasma spraying

| Спектр | Химические элементы, масс. % |      |      |      |       |   |       |      |      |    |      |       |
|--------|------------------------------|------|------|------|-------|---|-------|------|------|----|------|-------|
|        | C                            | Si   | Mn   | Ni   | S     | P | Cr    | Mo   | Ti   | Cu | W    | Fe    |
| 1      | 0,33                         | 0,21 | 0,14 | 6,82 | 0,001 | — | 14,08 | 0,26 | —    | —  | 2,42 | 75,74 |
| 2      | 0,31                         | 1,07 | 0,35 | 8,31 | 0,001 | — | 13,21 | 0,33 | 0,03 | —  | 7,56 | 68,83 |
| 3      | 0,27                         | 1,12 | 0,18 | 7,46 | —     | — | 12,46 | 0,31 | 0,02 | —  | 8,12 | 70,06 |
| 4      | 0,35                         | 0,21 | 0,36 | 8,03 | —     | — | 13,84 | 0,24 | —    | —  | 2,41 | 74,56 |
| 5      | 0,29                         | 2,13 | 0,21 | 7,65 | —     | — | 11,97 | 0,28 | 0,02 | —  | 8,78 | 68,67 |

(спектры 3 и 5). Содержание вольфрама на границе раздела составляет 7,56 масс.%, в покрытии — 8,12...8,78 масс.%. Высокое содержание вольфрама, перешедшее из оксидной фазы (из шеелитового концентрата) в покрытие (преимущественно карбидную фазу WC), является следствием восстановительного процесса (синтеза), протекающего еще на стадии плавления и диспергирования в потоке плазмы. Наличие большого содержания вольфрама в покрытии является неблагоприятным фактором, для которого требуется изменить состав шихты в пользу уменьшения содержания  $WO_3$  и  $CaWO_4$ , входящих в шеелитовый концентрат, например изменением пропорций (концентрат + углерод + бор) при формировании шихты. К основному достоинству плазменного напыления с использованием шеелитового концентрата относится высокая температура, позволяющая разрушать оксидное соединение тугоплавкого металла (вольфрама) и возгонять менее тугоплавкие.

Микротвердость полученного покрытия составила около 1000 HV (получено при нагрузке  $F = 50$  кгс и времени выдержки 10...15 с), микротвердость основания — 285...290 HV. Высокий показатель микротвердости обусловлен наличием карбидной фазы WC и не допустим, так как будет приводить к повышенному износу седла. Показатель прочности сцепления с покрытием — 67 МПа.

В процессе напыления деформации тарелки клапана не происходит. Расход материала, не достигающего поверхности детали, составляет до 30 %.

**Заключение.** По результатам экспериментов установлено, что:

- при формировании покрытия на поверхности клапана методом электродуговой наплавки с применением сварочной проволоки марки 12X18H10T и шихты на основе шеелитового концентрата содержание вольфрама в покрытии составляет 2,16...2,93 масс.%, микротвердость — 310 HV, адгезионная прочность — 370 МПа. В процессе наплавки происходит деформация тарелки

клапана и проплавление на глубину 800 мкм. Пористость полученного покрытия составляет от 3...11 %;

- при газопламенном напылении с применением сварочной проволоки марки 12X18H10T и шихты на основе шеелитового концентрата сформировано покрытие толщиной 2...3 мм, имеющее в среднем до 20 % пор, также присутствуют шлаковые микровключения. Содержание вольфрама в покрытии (карбидная фаза WC) составляет 6,13...6,65 масс.%, микротвердость покрытия — 420...480 HV, адгезионная прочность — 43 МПа. В процессе напыления деформации тарелки клапана не происходит;

- при плазменном напылении с применением сварочной проволоки марки 12X18H10T и шихты на основе шеелитового концентрата сформировано покрытие толщиной 1,0...2,5 мм, имеющее в среднем до 4 % пор, присутствуют шлаковые микровключения. Содержание вольфрама в покрытии (карбидная фаза WC) составляет 8,12...8,78 масс.%, микротвердость покрытия — 1000 HV, адгезионная прочность — 67 МПа. В процессе напыления деформации тарелки клапана не происходит.

Анализ полученных результатов показывает перспективность применения вышеуказанных методов при восстановлении поверхности выпускного клапана при условии их дальнейших исследований и совершенствования. Особого внимания заслуживает метод плазменного напыления при сравнении адгезионной прочности, микротвердости и пористости полученных покрытий. Применение шеелитового концентрата в экспериментах обусловлено наличием в его составе вольфрама, что позволяет изучить процесс его восстановления и перехода в состав стали.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиротенко И. В., Гогричиани Г. В. Проблемы повреждаемости силовых и теплонапряженных узлов тепловозных дизелей. Аналитический обзор // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ).

2017. Т. 76. № 2. С. 101–109. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-2-101-109>.

2. Сиротенко И. В., Коссов Е. Е. К вопросу повышения надежности крышки цилиндра тепловозного дизеля // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79. № 1. С. 39–47. DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-1-39-47.

3. Волков К. Г., Ипатов А. Г. К обоснованию способа восстановления тарелок клапанов автотракторных двигателей // Развитие инженерного образования и его роль в технической модернизации АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 65-летию подготовки инженеров-механиков Ижевской гос. сельскохозяйственной академии (Ижевск, 11–13 ноября 2020 г.). Ижевск: Ижевская гос. сельскохозяйственная академия, 2021. С. 40–50.

4. Секретов Р. С., Казанников О. В. Восстановление и упрочнение выпускных клапанов ДВС методом электроискрового легирования // Материалы секционных заседаний 59-й студенческой науч.-практ. конф. ТОГУ (Хабаровск, 27 мая 2019 г.): в 2 т. / отв. ред. И. Н. Пугачев. Хабаровск: Тихоокеанский гос. ун-т, 2019. Т. 1. С. 156–159.

5. Восстановления стержней клапанов электролитическим железением / Ю. П. Гнездилова [и др.] // Региональный вестник. 2017. № 3(8). С. 26–27.

6. Способ получения седел клапанов при восстановлении методом электродуговой наплавки / А. Е. Лебедев [и др.] // Автомобильная промышленность. 2019. № 5. С. 33–34.

7. Kim K. K., Karpova I. M. A magnetogasdynamic model of a welding arc // Russian Electrical Engineering. 2016. Vol. 87. No. 1. P. 46–50. DOI 10.3103/S1068371216010053.

8. Тойгамбаев С. К. Стенд для ремонта и восстановления деталей двигателей // Научное наследие. 2021. № 59-1 (59). С. 37–42. DOI 10.24412/9215-0365-2021-59-1-37-42.

9. Восстановление клапанов двигателей внутреннего сгорания плазменной наплавкой и напылением с модуляцией параметров / О. М. Тимохова [и др.] // Воронежский научно-технический вестник. 2018. Т. 1. № 1 (23). С. 53–67.

10. Газотермическое напыление: учеб. пособие / Л. Х. Балдаев [и др.]; под общ. ред. Л. Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.

11. Тихонов А. А., Иванов В. В., Беспалов А. В. Исследование износов и обоснование величины слоя металлопокрытия для восстановления выпускного клапана двигателя ЯМЗ // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти д-ра техн. наук, проф. Ф. Х. Бурмуклова (Саранск, 24–25 мая 2016 г.) / Институт механики и энергетики; отв. за выпуск А. В. Столяров. Саранск: Типография «Рузаевский печатник», 2016. С. 264–268.

12. Веремей Г. А. Обеспечение точности при восстановлении седел клапанов в авторемонтном производстве // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2021. № 3. С. 33–41.

13. Ворохобин С. В. Восстановление клапанов судовых дизелей // Вестник Морского государственного университета. 2016. № 74. С. 24–28.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**БАЛАХОНОВ Денис Игоревич,**

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «ДВГУПС»

**МАКАРОВ Иван Александрович,**

старший преподаватель, кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «ДВГУПС»

**ЯРАНЦЕВ Максим Владимирович,**

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «ДВГУПС»

Статья поступила в редакцию 05.08.2021 г., принята к публикации 20.09.2021 г.

**Для цитирования:** Балахонов Д. И., Макаров И. А., Яранцев М. В. Восстановление поверхности выпускного клапана методом плазменного напыления в сравнении с электродуговым и газопламенным методами // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 5. С. 260–268. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-260-268>.

## Resurfacing the exhaust valve by plasma spraying versus electric arc and gas flame methods

**D. I. BALAKHONOV, I. A. MAKAROV, M. V. YARANTSEV**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Far Eastern State University of Railways" (FGBOU VO "DVGUPS"), Khabarovsk, 680021, Russia

**Abstract.** In modern conditions of economic instability in various sectors of industry for the national economic complex, it is important to improve the technology for repairing parts of power units, while the development of modern technological methods for restoring the contact surfaces of parts should be carried out in the conditions of enterprises and be accessible. The article compares the most common methods of surface parts restoration, such as flame, plasma spraying and electric arc surfacing. Studied experience of various specialists working in this direction made it possible to implement these reduction methods using a charge based on a mineral tungsten-containing concentrate, boron and carbon. The process of alloying the resulting coatings was investigated,

where tungsten is in the form of tungsten trioxide ( $WO_3$ ) and calcium tungstate ( $CaWO_4$ ). A comparative analysis of the methods for restoring the surface of the exhaust valve cone of the D49 diesel engine has been carried out. The article presents results of micro- and macroanalysis of the structures of the obtained coatings and the base metal of the restored part, the results of the analysis of the chemical composition, the evaluation of the microhardness and adhesive strength of the adhesion of the obtained coatings to the surface of the base metal. Authors substantiated the prospect of applying the methods of gas-thermal restoration of the surface of parts in relation to the method of electric arc surfacing. Subsequent studies will focus on the installation of remanufactured parts in

the internal combustion engine of the locomotive, their operation in real conditions, and the assessment of reliability and durability. Research in this direction will improve the quality indicators of the restored surfaces of power unit parts of rolling stock.

**Keywords:** diesel valve D49; surface restoration; thermal spraying; flame spraying; electric arc surfacing; plasma spraying; scheelite concentrate

**DOI:** <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-260-268>

## REFERENCES

1. Sirotenko I.V., Gogrichiani G.V. *Problemy povrezhdaemosti silovyykh i teplotnapryazhennykh uzlov teplovoznnykh dizeley. Analiticheskiy obzor* [Damaging problems of power and heat-stressed assemblies of locomotive diesels. Analytical review]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 2, pp. 101–109. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-2-101-109>.
2. Sirotenko I.V., Kossov E.E. *K voprosu povysheniya nadezhnosti kryshki tsilindra teplovoznogo dizelya* [On the issue of improving the reliability of the cylinder head of the diesel engine]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2020, Vol. 79, no. 1, pp. 39–47. DOI: [10.21780/2223-9731-2020-79-1-39-47](https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-39-47).
3. Volkov K.G., Ipatov A.G. *K obosnovaniyu sposoba vosstanovleniya tarelok klapanov avtotraktornykh dvigateley* [To the substantiation of the method for restoring valve plates of autotractor engines]. *Razvitie inzhenernogo obrazovaniya i ego rol' v tekhnicheskoy modernizatsii APK. Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoy 65-letiyu podgotovki inzhenerov-mekhanikov Izhevskoy gos. sel'skokhoz. akademiiy (Izhevsk, 11–13 noyabrya 2020 g.)* [Development of engineering education and its role in the technical modernization of the agroindustrial complex. Materials of the Int. scientific-practical conf., dedicated to the 65<sup>th</sup> anniversary of the training of mechanical engineers of the Izhevsk State Agricultural Academy (Izhevsk, November 11–13, 2020)]. *Izhevsk, Izhevskaya gos. sel'skokhoz. akademiya* [Izhevsk State Agricultural Academy] Publ., 2021, pp. 40–50.
4. Sekretov R.S., Kazannikov O.V. *Vosstanovlenie i uprochnenie vypusknykh klapanov DVS metodom elektroiskrovogo legirovaniya* [Restoration and hardening of ICE exhaust valves by the method of electrospark alloying]. *Materialy sektionnykh zasedaniy 59-y studencheskoy nauch.-prakt. konf. TOGU (Khabarovsk, 27 maya 2019 g.): v 2 t.* [Materials of section sessions of the 59<sup>th</sup> student scientific-practical conference TOGU (Khabarovsk, May 27, 2019): in 2 volumes]. *Khabarovsk, Tikhookeanskii gos. un-t* Publ., 2019, Vol. 1, pp. 156–159.
5. Gnezdilova Yu.P., Serebrovskiy A.V., Lachkov V.D., Karpenko P.V. *Vosstanovleniya sterzhney klapanov elektroliticheskimi zheleznymi* [Restoration of valve stems by electrolytic iron]. *Regional'nyy vestnik*, 2017, no. 3 (8), pp. 26–27.
6. Lebedev A.E., Pavlov A.A., Lebedev D.V., Vatin A.A. *Sposob polucheniya sedel klapanov pri vosstanovlenii metodom elektrodugovoy naplavki* [Method for obtaining valve seats when restoring by electric arc surfacing]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2019, no. 5, pp. 33–34.
7. Kim K.K., Karpova I.M. *A magnetogasdynamic model of a welding arc*. *Russian Electrical Engineering*, 2016, Vol. 87, no. 1, pp. 46–50. DOI: [10.3103/S1068371216010053](https://doi.org/10.3103/S1068371216010053).
8. Toygambaev S.K. *Stend dlya remonta i vosstanovleniya detaley dvigateley* [Stand for repair and restoration of engine parts]. *The Scientific heritage*, 2021, no. 59-1 (59), pp. 37–42. DOI: [10.24412/9215-0365-2021-59-1-37-42](https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-59-1-37-42).
9. Timokhova O.M., Kadyrmetov A.M., Snyatkov E.V., Romanov V.V. *Vosstanovlenie klapanov dvigateley vnutrennego sgoraniya plazmennoy naplavkoy i napyleniem s modulyatsiey parametrov* [Restoration of valves of internal combustion engines by plasma surfacing and spraying with modulation of parameters]. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskii vestnik*, 2018, Vol. 1, no. 1 (23), pp. 53–67.
10. Baldaev L.Kh., Borisov V.N., Vakhlin V.A., Gannichenko G.I., Zatoka A.Ye., Zakharov B.M., Ivanov A.V. [et al.]. *Gazotermicheskoe napylenie. Ucheb. posobie* [Thermal spraying. Textbook]. *Moscow, Market DS*, 2007, 344 p.
11. Tikhonov A.A., Ivanov V.V., Bepalov A.V. *Issledovanie iznosov i obosnovanie velichiny sloya metallopokrytiya dlya vosstanovleniya vypusknoy klapana dvigatelya YaMZ* [Investigation of wear and substantiation of the size of the metal coating layer for the restoration of the exhaust valve of the YaMZ engine]. *Energoeffektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii i sistemy. Sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoy pamyati d-ra tekhn. nauk, prof. F. Kh. Burumkulova (Saransk, 24–25 maya 2016 g.)* / Institut mekhaniki i energetiki [Energy-efficient and resource-saving technologies and systems. Coll. of scientific papers of the Int. Scientific and Practical Conf. dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, prof. F. Kh. Burumkulov (Saransk, May 24–25, 2016), Institute of Mechanics and Power Engineering]. *Saransk, Tipografiya "Ruzaevskiy pechatnik"* [Printing house "Ruzaevskiy pechatnik"] Publ., 2016, pp. 264–268.
12. Veremey G.A. *Obespechenie tochnosti pri vosstanovlenii sedel klapanov v avtoremontnom proizvodstve* [Ensuring accuracy when restoring valve seats in car repair production]. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, 2021, no. 3, pp. 33–41.
13. Vorokhobin S.V. *Vosstanovlenie klapanov sudovykh dizeley* [Restoration of valves of marine diesel engines]. *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, no. 74, pp. 24–28.

## ABOUT THE AUTHORS

### Denis I. BALAKHONOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Railway Transport", FGBOU VO "DVGUPS"

### Ivan A. MAKAROV,

Senior Lecturer, Department "Railway Transport", FGBOU VO "DVGUPS"

### Maksim V. YARANTSEV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Railway Transport", FGBOU VO "DVGUPS"

Received 05.08.2021

Accepted 20.09.2021

■ E-mail: [karoxar@mail.ru](mailto:karoxar@mail.ru) (D.I. Balakhonov)

**For citation:** Balakhonov D.I., Makarov I.A., Yarantsev M.V. Resurfacing the exhaust valve by plasma spraying versus electric arc and gas flame methods // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (5): 260–268 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-260-268>.