

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-472072>

Оригинальное исследование



# Повышение износостойкости клапанов ДВС методом лазерной наплавки

А.В. Завитков, А.С. Локтев, А.Б. Люхтер

Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** При эксплуатации поршневых двигателей существует множество возможных причин, ведущих к отказу и дорогостоящему ремонту. Одним из распространённых факторов, способных негативно влиять на работу двигателя, является нарушение герметичности камеры сгорания. В процессе работы двигателя газы, сгорающие в камере, оказывают давление на рабочие поверхности клапана и седла. Если эти поверхности не обеспечивают герметичность, то отработавшие газы начинают несвоевременно проникать в выпускной трубопровод, а в некоторых случаях — и во впускной, кроме того, ухудшается наполнение цилиндров свежим зарядом. В большинстве случаев нарушение герметичности камеры сгорания происходит в результате образования дефектов на рабочих поверхностях сопряжения клапан-седло. Чтобы избежать нарушений герметичности камеры сгорания и других проблем с работой поршневых двигателей, необходимо минимизировать износ на рабочей поверхности клапана путём нанесения износостойкого покрытия.

**Цель** — нанесение износостойкого и коррозионностойкого покрытия на рабочую поверхность клапана для повышения эксплуатационного ресурса.

**Методы исследования.** Факторы, влияющие на надёжность сопряжения клапан-седло определены путём анализа литературы. Лазерная наплавка на фаску клапана проводилась на лазерном роботизированном комплексе на базе иттербиевого волоконного лазера. Качество наплавленного покрытия на рабочей фаске клапана определено путём металлографического исследования и капиллярного контроля.

**Результаты.** При лазерной наплавке на рабочую фаску клапана порошкового материала марки ПР-08Х17Н8С6Г удалось получить равномерный наплавленный слой с микротвёрдостью 435–485 HV (44–48 HRC).

**Заключение.** Результаты исследований могут быть использованы для разработки и внедрения новых разновидностей износостойких покрытий, что даёт возможность увеличить срок службы и проводить ремонтные работы по восстановлению изношенных поверхностей деталей.

**Ключевые слова:** ДВС; выпускной клапан; дефекты; виды изнашивания; лазерная наплавка; износ; защитное покрытие.

## Как цитировать:

Завитков А.В., Локтев А.С., Люхтер А.Б. Повышение износостойкости клапанов ДВС методом лазерной наплавки // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 3. С. 217–224. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-472072>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-472072>

Original study article

# Increasing the wear resistance of the ICE's valves with the laser cladding method

Alexey V. Zavitkov, Alexander S. Loktev, Alexander B. Lyukhter

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** There is plenty of factors leading to failure and expensive repair of piston engines at their operation. One of the widespread factors capable of affecting the engine operation is combustion chamber sealing failure. During the engine operation, gases combusting in a chamber bring pressure on working surfaces of a valve and a valve seat. If these surfaces do not ensure sealing, exhaust gases begin to leak in the exhaust manifold untimely, in some cases in the intake manifold as well. In addition, filling of cylinders with inlet charge worsens. In majority of cases, combustion chamber sealing failure caused by defect formation at working surfaces of the valve — valve seat coupling. In order to avoid combustion chamber sealing failures and other issues of operation of piston engines, it is necessary to minimize working surfaces wearing by means of wear-resistant coating.

**AIMS:** Wear- and corrosion-resistant coating of valve's working surface to increase service life.

**METHODS:** The factors affecting the reliability of the valve — valve seat coupling were defined by means of literary sources analysis. Laser cladding at the valve's chamfer was conducted with the laser robotized facility based on ytterbium fiber laser. Quality of the coated surface at the valve's working chamfer was defined by means of metallographic study and liquid penetrant test.

**RESULTS:** After laser cladding of the PR-08Kh17N8S6G powder material at the valve's working chamfer, the uniform coated surface with microhardness of 435–485 HV (44–48 HRC) was obtained.

**CONCLUSIONS:** The study results may be used for development and implementation of new kinds of wear-resistant surfaces that make it possible to increase the service life and to repair worn-down surfaces of components.

**Keywords:** ICE; exhaust valve; defects; kinds of wearing; laser cladding; wearing; protective surface.

## To cite this article:

Zavitkov AV, Loktev AS, Lyukhter AB. Increasing the wear resistance of the ICE's valves with the laser cladding method. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023;17(3): 217–224. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-472072>

Received: 02.06.2023

Accepted: 15.07.2023

Published online: 15.10.2023

## ВВЕДЕНИЕ

### Виды изнашивания и причины разрушения клапанов

Износ и выход из строя клапанов влечёт за собой проблемы для двигателя: снижение производительности, а также высокие затраты на ремонт. Анализ автора *Kwon OG* показал, что основными причинами отказов клапанов являются:

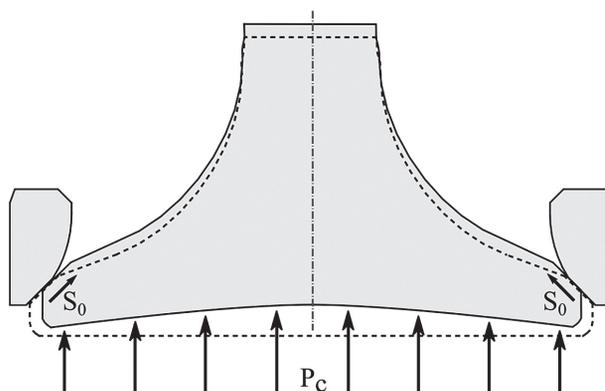
- термические и механические напряжения, в связи с чем происходит потеря твёрдости основного металла;
- сильное окисление поверхности, что приводит к истиранию рабочих поверхностей тарелки клапана и седла [1].

Впускные клапаны выходят из строя намного реже, чем выпускные, т. к. тарелка впускного клапана остаётся более холодной за счёт обдува её холодным впускным зарядом, в случае с выпускным — температура тарелки находится в пределах 500...700 °С, но в некоторых экстремальных условиях (при перегрузке двигателя или неправильном режиме работы) температура впускного клапана может значительно превышать эти значения. Из-за таких высоких температур, при неправильном выборе материала во время проектирования он теряет свои механические свойства: пластичность и прочность. Поэтому необходимо применять технологии, позволяющие создавать новые покрытия на тарелке клапана с высокими механическими свойствами и эффективной теплопередачей к седлу и к головке блока цилиндров [1, 2].

В литературе [3] показывают, что изнашивание тарелки клапана происходит по трём направлениям: абразивному, адгезионному и коррозионному износу. Это происходит из-за скольжения частиц износа сопрягаемых поверхностей с твёрдыми продуктами сгорания топлива, некачественного смазочного масла. К данному виду износа приводят несовместимые материалы седла и клапана, высокая температура, малое количество смазки, а также высокое давление сгорания [4].

*M Panjuru* и другие в своих работах представили результаты по получению новых покрытий на тарелке клапана, где слои обладали следующими улучшенными характеристиками: по абразивному износу защита от коррозии, адгезионный износ, улучшение теплопроводности, устойчивость к окислению. Для получения таких покрытий были использованы разные виды материалов: оксиды, карбиды, металлокерамики, а также композитные материалы [2, 5, 6].

Главные факторы, которые вносят значительный вклад в износ уплотнительной поверхности — это удар о седло и микроскольжение уплотнения из-за упругой деформации тарелки клапана во время сгорания (рис. 1).



**Рис. 1.** Деформация тарелки клапана из-за давления сил газов ( $P_2$ ) ( $S_0$  — микроскольжение).

**Fig. 1.** Deformation of valve plate caused by gases pressure ( $P_2$ ) ( $S_0$  is microslipping).

Данное микроскольжение зависит от жёсткости тарелки, угла контакта и приложенной силы давления сгорания [7, 8, 9, 10].

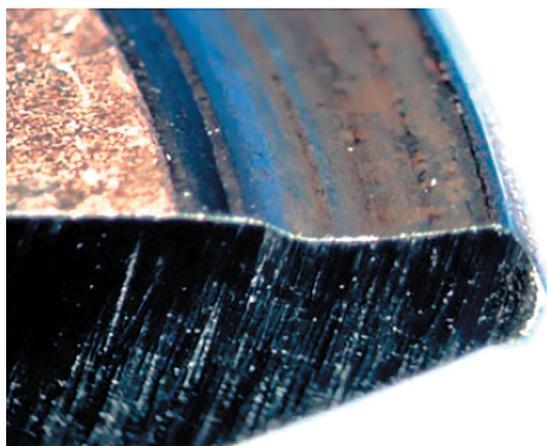
Удар клапана о седло и микроскольжение рабочих поверхностей сопряжения, вызываемое силой давления газов, в совокупности с высокой температурой (500–700 °С) приводят к образованию дефектов или выходу из строя сопряжения [3].

### Виды дефектов тарелки клапана

Сопряжение клапан-седло в двигателе внутреннего сгорания может иметь несколько дефектов, которые ведут к снижению эффективности работы двигателя и даже выхода его из строя.

Основные дефекты:

1. Износ: при работе двигателя клапан и седло изнашиваются (рис. 2), что приводит к неправильному контакту между ними и утечке газов. Рецессия клапана и седла является неизбежной при работе двигателя, а при повышенных нагрузках это явление прогрессирует. Причинами того могут быть следующие факторы:
  - направляющая втулка и седло клапана имеют геометрические отклонения, т. е. не соосны;
  - слишком высокий уровень температуры;
  - седло клапана подвергается слишком высоким механическим нагрузкам, например, воздействию со стороны усиленных клапанных пружин или остропрофильных кулачков распределительных валов [11].
2. Коррозия (коррозионно-механическое окислительное изнашивание) и эрозия (эрозионное изнашивание): причинами коррозии в сопряжении клапан-седло являются повторяющиеся с высокой частотой воздействия агрессивной среды ОГ при повышенной температуре и эрозионное воздействие струи газа и продуктов неполного сгорания топлива на клапаны и седла. После некоторого времени эксплуатации седло покрывается нагаром, который при высокой



**Рис. 2.** Износ на рабочей поверхности.  
**Fig. 2.** Wearing at the working surface.

температуре нагревается и приводит к выжиганию опорной поверхности клапана, что способствует потере герметичности в камере сгорания.

Ускорение процесса коррозии может быть вызвано неправильной топливно-воздушной смесью. Обеднённая смесь приводит к повышенной температуре сгорания, что усиливает коррозионное действие отработавших газов. При излишне обогащённой смеси сгорание проходит медленнее и при более низкой температуре. Несгоревшие тяжёлые фракции топлива ускоряют осаждение слоя нагара, коррозионно-агрессивного к материалу клапана. Коррозионные процессы на клапанах и седлах интенсифицируются в большой степени в период длительных простоев двигателя, незащищённого от коррозии. Оставшиеся в цилиндрах топливо и отработавшие газы образуют электрохимическую коррозионную среду, повреждающую клапаны и седла [12].

3. Трещины: усталостные свойства материалов, из которых изготавливают клапаны, ухудшаются из-за высокой температуры и циклических ударных нагрузок, что является причиной возникновения множественных усталостных трещин.

Наиболее частой причиной выхода клапанов из строя является износ рабочей поверхности фаски. Для повышения её износостойкости современные производители применяют различные методы нанесения износостойких покрытий.

### Методы восстановления и нанесения защитных покрытий на фаску тарелки клапана

Одним из доступнейших методов для нанесения покрытий с целью защиты деталей от износа или восстановления изношенных участков является электродуговая наплавка. Наиболее часто такой метод применяют для ремонта деталей машин и механизмов вследствие простоты её осуществления и мобильности

технологического оборудования. Электродуговая наплавка отличается возможностью выполнения работ вручную и низкой стоимостью оборудования, вкуче с высокой производительностью процесса. Среди недостатков стоит отметить высокий уровень термических деформаций и низкое качество получаемого покрытия [13].

Самым распространённым методом нанесения износостойких покрытий в производственных условиях является газопламенная наплавка по причине более высокого качества покрытия по сравнению с электродуговой наплавкой и высокой производительностью. Нанесение покрытий газопламенной наплавкой сопровождается значительными термическими деформациями обрабатываемых изделий, что приводит к большим затратам на механическую обработку [14].

Кроме того, существуют методы нанесения гальванических покрытий, но из-за малой толщины получаемого покрытия (6–20 мкм) эти методы непригодны для восстановления изношенных фасок клапанов, т. к. износ на этой поверхности может достигать нескольких миллиметров.

Перечисленные методы обладают рядом недостатков, не позволяющих использовать их для нанесения износостойких покрытий на фаску клапана без значительного повышения себестоимости.

Наиболее сбалансированным и перспективным является метод лазерной порошковой наплавки. Этот метод позволяет получать слой покрытия толщиной от 0,1 мм до 5 мм, кроме того, в виду более точных границ воздействия лазерного излучения можно наносить равномерные по ширине и высоте слои. Качество покрытия значительно выше, чем при газопорошковой и электродуговой наплавке [15, 16]. Производительность процесса не уступает вышеперечисленным методам и составляет около 10 кг/ч. Важным преимуществом становится малая зона термических влияний, что уменьшает тепловые деформации до около нулевых значений при наплавке на изделие.

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения экспериментальных исследований использовался лазерный роботизированный комплекс наплавки (ЛРК-Н), включающий в себя: 6-осевой промышленный робот, устройство подачи порошкового материала «Дрозд», предназначенный для дозированной подачи порошкового материала в экспериментальную лазерную наплавочную головку с модулем подачи порошка с четырёх сторон, использование данной насадки рассматривалось автором [17,18], где было установлено, что она обеспечивает формирования установленно-го непрерывного потока порошкового материала в зону наплавки. Источником излучения был иттербиевый волоконный лазер ЛС-3-К мощностью 3 кВт. Наплавка производилась без подогрева.

В качестве наплавочного материала использовался металлический порошок марки ПР-08Х17Н8С6Г с размером частиц 63–125 мкм. Наибольшая массовая доля в порошке: Fe составляет около 66%; легирующие компоненты: Cr — 17,7%, Ni — 7,97%, Si — 5,55%, Mn — 1,93%, а остальные компоненты (C, Co) составляют сотые доли процента.

Лазерная наплавка была выполнена с использованием непрерывного лазерного излучения в защитном (6 л/мин) и транспортирующем (25 л/мин) чистом газобразном аргоне (чистота 99,998%).

Наплавленное покрытие проходило следующие виды контроля:

- капиллярный контроль по ГОСТ 18442-80;
- металлографические исследования;
- определение микротвёрдости.

Металлографические исследование производилось на металлографическом микроскопе *Leica DM ILM*. Металлография проводилась для выявления дефектов в структуре, измерении толщины наплавленного слоя, зоны проплавления и зоны термического влияния. Также



**Рис. 3.** Внешний вид наплавленных выпускных клапанов.  
**Fig. 3.** Outer view of the coated exhaust valves.

проводилось измерение микротвёрдости для выявления твёрдости отдельных фаз.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании ранее проводимых исследований по нанесению порошкового материала ПР-08Х17Н8С6Г был выбран технологический режим лазерной наплавки [19, 20]. Наплавка производилась в один слой. Внешний вид наплавленных клапанов представлен на рис. 3.

Один из клапанов проходил неразрушающий контроль (капиллярный), второй — металлографический анализ.

Капиллярный контроль проводился с целью обнаружения дефектов, таких как поры, трещины, раковины и т. п. Результат представлен на рис. 4.

По результатам капиллярного контроля дефекты обнаружены не были.

Металлографический анализ выявления внутренних дефектов в зоне наплавки и зоне перемешивания проводился на подготовленных микрошлифах, представляющих собой поперечное сечение, вырезанного сегмента наплавки. Высота наплавленного слоя — 1,1 мм.

Микрошлиф наплавленного покрытия представлен на рис. 5.

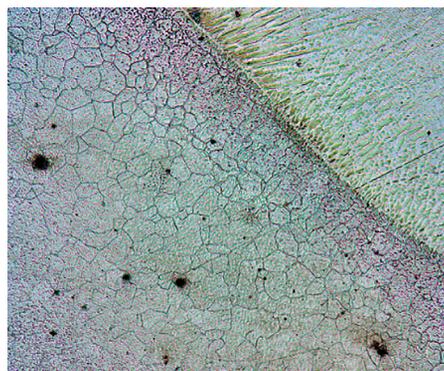
На основании проведённых металлографических исследований дефектов в наплавленном покрытии не обнаружено. Микротвёрдость покрытия составила 435–485 HV (44–48 HRC), зоны проплавления — 334–373 HV (34–38 HRC), в зоне термического влияния — 128–144 HV.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого литературного обзора были выявлены основные дефекты, которые возникают на поверхности тарелки клапана ДВС. Они могут быть вызваны различными причинами: износом, коррозией,



**Рис. 4.** Капиллярный контроль наплавленного покрытия на фаску выпускного клапана.  
**Fig. 4.** The liquid penetrant test of the coated surface at the exhaust valve's chamfer.



**Рис. 5.** Микрошлиф наплавленного покрытия.  
**Fig. 5.** A microslice of the coated surface.

перегревом и другими факторами, приводящими к снижению производительности двигателя, а также выхода из строя.

Для устранения дефектов используют различные методы нанесения защитных покрытий. Одним из наиболее эффективных методов является лазерная порошковая наплавка. Этот метод позволяет наносить на поверхность тарелки клапана устойчивое к износу и коррозии покрытие, что позволяет продлить срок эксплуатации детали.

С целью подтверждения эффективности метода были выполнены экспериментальные работы по лазерной наплавке износостойкого покрытия на поверхность фаски клапана. После этого были проведены капиллярный контроль, металлографические исследования наплавленного слоя, показавшие отсутствие дефектов на обработанной поверхности. Кроме того, были получены результаты по замеру микротвердости — 44–48 HRC, что свидетельствует о высокой стойкости покрытия к износу.

Таким образом, лазерная порошковая наплавка — эффективный метод нанесения защитных покрытий на тарелку клапана ДВС. Это позволяет устранить дефекты, приводящие к снижению производительности двигателя, и продлить его срок эксплуатации. Результаты экспериментальных работ подтверждают эффективность этого метода.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Вклад авторов.** А.В. Завитков — поиск публикаций по теме исследования, написание текста рукописи, проведение экспериментальных работ по лазерной наплавке;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kwon O.G., Han M.S. Failure analysis of the exhaust valve stem from a Waukesha P9390 GSI gas engine // *Engineering Failure Analysis*. 2004. Vol. 11, N 3. С. 439–447. doi: 10.1016/j.engfailanal.2003.05.015
2. Panțuru M., Chicet D., Paulin C., et al. Wear aspects of internal combustion engine valves // *IOP*

А.Б. Люхтер — экспертная оценка, утверждение финальной версии публикации; А.С. Локтев — проведение исследований наплавленного покрытия, создание изображений. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** A.V. Zavitkov — search for publications, writing the text of the manuscript, conducting experimental work on laser cladding; A.B. Lyukhter — expert opinion, approval of the final version; A.S. Loktev — conducting research on the deposited coating, creating images. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2016. Vol. 147. P. 012036. doi: 10.1088/1757-899X/147/1/012036

3. Forsberg P., Hollman P., Jacobson S. Wear mechanism study of exhaust valve system in modern heavy duty combustion engines // *Wear*. 2011. Vol. 271, N 9. P. 2477–2484. doi: 10.1016/j.wear.2010.11.039

4. Raghuwanshi N.K., Pandey A., Mandloi R.K. Failure analysis of internal combustion engine valves: a review // *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2012. Vol. 1, N 2. P. 173–181.
5. Dorfman M.R. Thermal spray applications // *Advanced Materials & Processes*. 2002. Vol. 160, N 10. P. 66–69.
6. Dorfman M.R. Thermal spray basics // *Advanced Materials & Processes*. 2002. Vol. 160, N 7. P. 47–51.
7. Malatesta M.J., Barber G.C., Larson J.M., et al. Development of a laboratory bench test to simulate seat wear of engine poppet valves // *Tribology Transactions*. 1993. Vol. 36, N 4. P. 627–632. doi: 10.1080/10402009308983204
8. Forsberg P. Combustion valve wear: a tribological study of combustion valve sealing interfaces. Doctoral thesis. Uppsala, 2013.
9. Cavalieri F.J., Zenklusen F., Cardona A. Determination of wear in internal combustion engine valves using the finite element method and experimental tests // *Mechanism and machine theory*. 2016. Vol. 104. P. 81–99. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.017
10. Forsberg P., Debord D., Jacobson S. Quantification of combustion valve sealing interface sliding — A novel experimental technique and simulations // *Tribology International*. 2014. Vol. 69. P. 150–155. doi: 10.1016/j.triboint.2013.09.014
11. MAHLE. Компоненты двигателей и фильтры. Дефекты, их причины и профилактика. Stuttgart: MAHLE.
12. Scott C.G., Riga A.T., Hong H. The erosion-corrosion of nickel-base diesel engine exhaust valves // *Wear*. 1995. Vol. 181. P. 485–494.
13. Черевань В.С. Восстановление деталей сваркой и наплавкой // Способы, методы и процессы технического и технологического развития. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. Стерлитамак 2020. Уфа: Агентство международных исследований, 2020. С. 102–104.
14. Бабанин А.Я., Чухаркин А.В. Упрочняющая и восстановительная наплавка клапанов газораспределительного механизма двигателей внутреннего сгорания // Сб. науч. тр. Донбас. гос. техн. ин-та. Вып. 68. Алчевск, 2021. С. 26–31.
15. Завитков А.В., Печников И.С. Современные методы восстановления и повышения износостойкости деталей двигателя внутреннего сгорания // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XXIII Международной научно-практической конференции. Владимир, 18–19 ноября 2021 года. Владимир: Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2021. С. 111–115.
16. Zieliński A., Smolenska H., Serbinski W., et al. Characterization of the Co-base layers obtained by laser cladding technique // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 164. P. 958–963.
17. Lyukhter A.B., Palkin P.A., Zavitkov A.V., et al. Dependence of the structure and characteristics of a Russian alternative for AISI 304 stainless steel powder on the parameters of their laser cladding on substrates from low-carbon and structural steels // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 681, N 1. P. 012028. doi: 10.1088/1757-899X/681/1/012028
18. Палкин П.А., Люхтер А.Б., Завитков А.В. Опыт отработки технологии лазерной наплавки порошковых материалов // Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2019. V Международная конференция. Ч. 2. 2019. Москва, 12–15 февраля 2019 года. Москва: НИЯУ «МИФИ», 2019. С. 279–281.
19. Гоц А.Н., Люхтер А.Б., Гусев Д.С., и др. Выбор режимов лазерной наплавки порошка ПР-08Х17Н8С6Г // *Черные металлы*. 2020. №. 11(1067). С. 46. doi: 10.17580/chm.2020.11.07
20. Gots A.N., Gusev D.S., Lukhter A.B., et al. Selection of rational modes of laser powder cladding // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 971, N 2. P. 022093.

## REFERENCES

1. Kwon OG, Han MS. Failure analysis of the exhaust valve stem from a Waukesha P9390 GSI gas engine. *Engineering Failure Analysis*. 2004;11(3):439–447. doi: 10.1016/j.engfailanal.2003.05.015
2. Panțuru M, Chicet D, Paulin C, et al. Wear aspects of internal combustion engine valves. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2016;147:012036. doi: 10.1088/1757-899X/147/1/012036
3. Forsberg P, Hollman P, Jacobson S. Wear mechanism study of exhaust valve system in modern heavy duty combustion engines. *Wear*. 2011;271(9):2477–2484. doi: 10.1016/j.wear.2010.11.039
4. Raghuwanshi NK, Pandey A, Mandloi RK. Failure analysis of internal combustion engine valves: a review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2012;1(2):173–181.
5. Dorfman MR. Thermal spray applications. *Advanced Materials & Processes*. 2002;160(10):66–69.
6. Dorfman MR. Thermal spray basics. *Advanced Materials & Processes*. 2002;160(7):47–51.
7. Malatesta MJ, Barber GC, Larson JM, et al. Development of a laboratory bench test to simulate seat wear of engine poppet valves. *Tribology Transactions*. 1993;36(4):627–632. doi: 10.1080/10402009308983204
8. Forsberg P. Combustion valve wear: a tribological study of combustion valve sealing interfaces. Doctoral thesis. Uppsala; 2013.
9. Cavalieri FJ, Zenklusen F, Cardona A. Determination of wear in internal combustion engine valves using the finite element method and experimental tests. *Mechanism and machine theory*. 2016;104:81–99. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.017
10. Forsberg P, Debord D, Jacobson S. Quantification of combustion valve sealing interface sliding — A novel experimental technique and simulations. *Tribology International*. 2014;69:150–155. doi: 10.1016/j.triboint.2013.09.014
11. MAHLE. Engine components and filters. Defects, their causes and prevention. Stuttgart: MAHLE. (In Russ).
12. Scott CG, Riga AT, Hong H. The erosion-corrosion of nickel-base diesel engine exhaust valves. *Wear*. 1995;181:485–494.
13. Cherevan VS. Restoration of parts by welding and surfacing. Methods, methods and processes of technical and technological development. In: *Collection of articles based on the results of the International Scientific and Practical Conference. Sterlitamak 2020*. Ufa: Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy; 2020:102–104. (In Russ).
14. Babanin AYa, Chukharkin AV. Hardening and restorative surfacing of valves of the gas distribution mechanism of internal combustion engines. *Sat. scientific tr. Donbass. state tech. in-ta*. Iss. 68. Alchevsk; 2021:26–31. (In Russ).

- 15.** Zavitkov AV, Pechnikov IS. Modern methods of restoring and improving the wear resistance of internal combustion engine parts. In: *Actual problems of vehicle operation. Proceedings of the XXIII International Scientific and Practical Conference. Vladimir, November 18–19, 2021.* Vladimir: Vladimirskiy gosudarstvennyy universitet im AG i NG Stoletovyykh; 2021;111–115. (In Russ).
- 16.** Zieliński A, Smolenska H, Serbinski W, et al. Characterization of the Co-base layers obtained by laser cladding technique. *Journal of Materials Processing Technology.* 2005;164:958–963.
- 17.** Lyukhter AB, Palkin PA, Zavitkov AV, et al. Dependence of the structure and characteristics of a Russian alternative for AISI 304 stainless steel powder on the parameters of their laser cladding on substrates from low-carbon and structural

- steels. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019;681(1):012028. doi: 10.1088/1757-899X/681/1/012028
- 18.** Palkin PA, Lyukhter AB, Zavitkov AV. Experience in developing the technology of laser cladding of powder materials. *Laser, plasma research and technologies LAPLAZ-2019. V International Conference. Part 2. 2019. Moscow, February 12–15, 2019.* Moscow: NIYaU "MIFI"; 2019:279–281. (In Russ).
- 19.** Gots AN, Lyukhter AB, Gusev DS, et al. Choice of modes of laser cladding of powder PR-08Kh17N8S6G. *Chernye metally.* 2020;11(1067):46. (In Russ). doi: 10.17580/chm.2020.11.07
- 20.** Gots AN, Gusev DS, Lyukhter AB, et al. Selection of rational modes of laser powder cladding. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;971(2):022093.

## ОБ АВТОРАХ

### \* **Завитков Алексей Викторович,**

аспирант кафедры «Тепловые двигатели и энергетические установки»;  
адрес: Российская Федерация, 600000, Владимир,  
ул. Горького, д. 87;  
ORCID: 0000-0003-4323-5398;  
eLibrary SPIN: 9599-0692;  
e-mail: vip.zavitkov@mail.ru

### **Локтев Александр Сергеевич,**

магистрант кафедры «Тепловые двигатели и энергетические установки»;  
ORCID: 0009-0004-5978-2219;  
e-mail: loktev@laser33.ru

### **Люхтер Александр Борисович,**

канд. техн. наук,  
доцент кафедры «Тепловые двигатели и энергетические установки»;  
ORCID: 0000-0003-1523-0637;  
eLibrary SPIN: 5633-5549;  
e-mail: 3699137@mail.ru

## AUTHORS' INFO

### \* **Alexey V. Zavitkov,**

Postgraduate of the Heat Engines and Power Plants Department;  
address: 87 Gorkiy street, Vladimir 600000,  
Russian Federation;  
ORCID: 0000-0003-4323-5398;  
eLibrary SPIN: 9599-0692;  
e-mail: vip.zavitkov@mail.ru

### **Alexander S. Loktev,**

Undergraduate of the Heat Engines and Power Plants Department;  
ORCID: 0009-0004-5978-2219;  
e-mail: loktev@laser33.ru

### **Alexander B. Lyukhter,**

Dr. Sci. (Tech.),  
Associate Professor of the Heat Engines and Power Plants Department;  
ORCID: 0000-0003-1523-0637;  
eLibrary SPIN: 5633-5549;  
e-mail: 3699137@mail.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author