

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-3-10



УДК 621.791.725

UDC 621.791.725

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**МЕТОДИКА УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НАПЛАВКОЙ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

**METHOD FOR STRENGTHENING PARTS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES BY SURFACING OF CERAMIC MATERIALS**

✉<sup>1</sup> **Волков Кирилл Георгиевич**, к.т.н., научный сотрудник, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Ижевск, e-mail: [wolkow-kirill@mail.ru](mailto:wolkow-kirill@mail.ru)

✉<sup>1</sup> **Volkov Kirill Georgievich**, candidate of technical sciences, researcher, Udmurt federal research center of the Ural branch of the Russian academy of sciences, Izhevsk, e-mail: [wolkow-kirill@mail.ru](mailto:wolkow-kirill@mail.ru)

**Ипатов Алексей Геннадьевич**, к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация и ремонт машин», Удмуртский государственный аграрный университет, г. Ижевск.

**Ipatov Alexey Gennadievich**, candidate of technical sciences, associate professor of the department "Operation and repair of machines", Udmurt state agrarian university, Izhevsk.

**Аннотация.** В работе представлена методика упрочнения деталей двигателей внутреннего сгорания на примере выпускных клапанов ГРМ. Для упрочнения рабочей поверхности тарелки клапана использовалось покрытие на основе металлокерамической порошковой композиции, наплавляемой короткоимпульсной лазерной установкой. Выполнены исследования физико-механических характеристик упрочняющего покрытия, выполнена оценка ресурса упрочненного выпускного клапана.

**Annotation.** The paper presents a method for strengthening parts of internal combustion engines using timing exhaust valves as an example. To strengthen the working surface of the valve disc, a coating based on a metal-ceramic powder composition, fused with a short-pulse laser system, was used. Studies of the physical and mechanical characteristics of the strengthening coating have been carried out, and the service life of the reinforced exhaust valve has been assessed.

**Ключевые слова:** УПРОЧНЯЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ, КОРОТКОИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА, МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ.

**Keywords:** STRENGTHENING COATING, SHORT PULSE LASER SURFACING, CERAMIC COATING.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

**1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы**

Повышение мощности, уменьшение потребления топлива, снижение токсичных выбросов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является общемировой тенденцией. В первую очередь это связано с повышением экономической эффективности использования ДВС во всех отраслях экономики. Повышение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания приво-

дит к увеличению нагрузок на узлы и агрегаты. Форсирование ДВС приводит к ухудшению условий смазывания пар трения, к повышению температурного фона в камере сгорания, увеличению механических нагрузок [1-13]. Увеличение негативного воздействия на детали двигателей внутреннего сгорания приводит к сокращению срока службы, что впоследствии ухудшает экономическую эффективность от принятых мер по повышению эксплуатационных показателей. Для решения возникшей проблемы предлагаются различные методы упрочнения как деталей ДВС, так и деталей машин в целом. Упрочнение деталей машин, либо отдельных рабочих поверхностей производится различными способами: механической, термической обработкой, наплавкой, модификацией поверхностного слоя и т. д. В [14] представлена технология термомеханической обработки конструкционных материалов, позволяющей получать цилиндрические детали с повышенным уровнем механических свойств, например для полый цилиндрической детали из стали 30ХГСН2А предел прочности  $\sigma_b = 1879$  МПа, предел пропорциональности  $\sigma_{0,2} = 1721$  МПа, условное относительное удлинение  $\delta = 13,3$  %, условное относительное сужение  $\psi = 63,5$  %). Данный процесс заключается в предварительном нагреве детали токами высокой частоты, последующем винтовом обжати и охлаждении. Данный процесс описан в [7] на примере пальцев траков гусеничных машин. В [15-17] представлена технология по восстановлению коленчатых валов ДВС с обеспечением требуемого ресурса, который достигается в условиях ремонтного производства. Данная технология основана на плазменном напылении специального покрытия и одновременной электро-механической обработке с последующим охлаждением струями воды. Это позволило получить улучшенные физико-механические и трибологические показатели поверхности шеек коленчатого вала с покрытием относительно метода с последующей электро-механической обработкой. Одним из распространенных способов создания покрытий является гальваническое осаждение металла из жидкого электролита на подложку. Таким методом в работе [18] предлагается восстановление и упрочнение толкателей газораспределительного механизма.

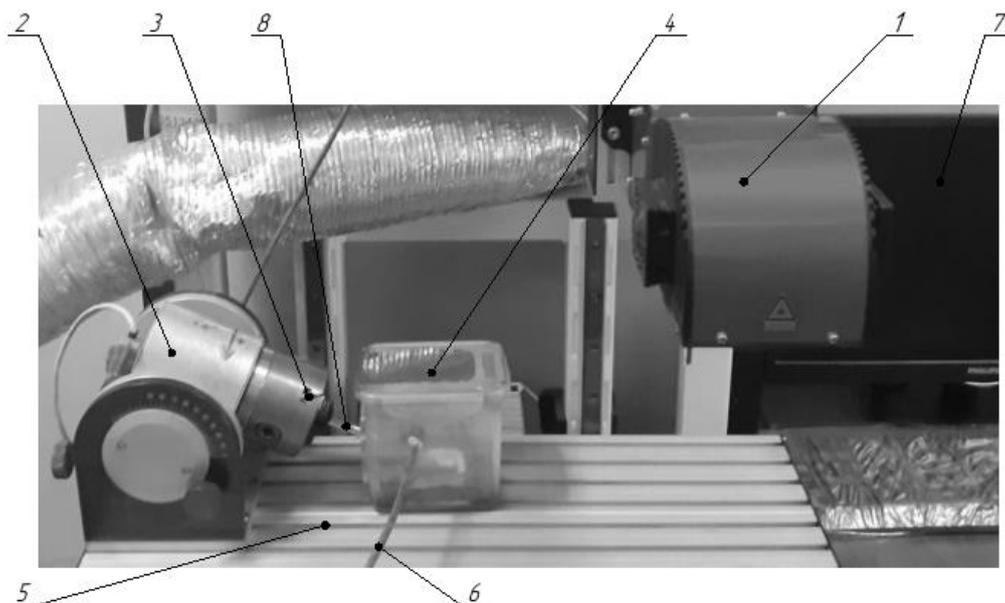
Несмотря на многообразие технологий и методик по упрочнению деталей машин, существует множество открытых вопросов и не в полной мере решенных задач. Поэтому разработка новых методик для увеличения ресурса является актуальной. Несмотря на многочисленные исследования и разработанные методики технологии по упрочнению рабочей фаски выпускных клапанов ГРМ двигателей внутреннего сгорания, вопрос по увеличению ресурса выпускных клапанов и сопряжения «клапан-седло» является открытым. Наиболее остро данная проблема наблюдается при работе ДВС на относительно дешевом [13, 19] газовом топливе. Использование газобразного топлива приводит к повышению температуры отработавших газов на 15 % по отношению к работе на бензине и на 25 % при работе на дизельном топливе [11]. Увеличение температуры продуктов сгорания, обтекающих рабочую фаску выпускного клапана, приводит к окислению защитного покрытия и преждевременному разрушению поверхности. Исходя из этого, разработка методики упрочнения поверхности рабочей фаски выпускного клапана ГРМ является основной целью данной работы.

## 2 Материалы и методы

Для упрочнения поверхности рабочей фаски выпускного клапана использовалась порошковая композиция на основе никеля с добавлением карбида кремния и диоксида циркония. Никелевая основа позволяет достигать высоких показателей жаростойкости покрытия (температура окисления 800 °С). Также никель выступает в качестве пластичной матрицы в разработанной композиции, воспринимая ударные нагрузки, возникающие при посадке клапана в седло. Карбид кремния дополнительно повышает жаростойкость композиции за счет образования оксидной пленки в приграничном слое. Диоксид циркония повышает твердость и плотность покрытия [1, 20, 21]. Затем готовилась суспензия, состоящая из порошковой композиции, спирта этилового и канифоли сосновой.

Полученная суспензия наносилась на обрабатываемую поверхность выпускного клапана специальным аппликатором, подвергалась выдержке для высыхания. Подготовленный

клапан устанавливался в специальную герметичную камеру, заполняемую аргоном. Данная камера устанавливалась на стол короткоимпульсной лазерной установки. Стержень клапана зажимался в трехкулачковый патрон привода с шаговым электродвигателем. Наплавка производилась сканированием поверхности обмазки лазерным лучом, оплавливающим порошковую суспензию и тонкий слой металла подложки. Затем производился поворот клапана вокруг продольной оси на угол 0,9 градуса. Схема установки для наплавки представлена на рис. 1.



1 – лазерная установка, 2 – привод клапана, 3 – трехкулачковый патрон, 4 – камера для наплавки, 5 – рабочий стол установки, 6 – трубка для подвода аргона, 7 – компьютер для управления установкой; 8 – стержень клапана

Рисунок 1 – Установка для наплавки упрочняющего покрытия

Для обеспечения требуемого качества поверхности клапан после наплавки подвергался алмазному выглаживанию на токарно-винторезном станке 95ТС-1. Данная операция позволяла достичь шероховатости поверхности Ra 0,63 мкм. Более подробно технология наплавки и алмазного выглаживания описаны в работе [2].

Для выявления физико-механических характеристик упрочняющего покрытия рабочей фаски выпускного клапана был проведен ряд исследований, связанных с определением трибологических параметров, металлографическим анализом, определением микротвердости, рентгеноструктурным фазовым анализом. Для выполнения перечисленных исследований использовались стандартные и общепринятые методики, описанные в [5, 6, 12, 17]. В качестве оборудования были выбраны: машина трения 2070 СМТ-1, оптический микроскоп НЕОРНОТ-32, электронный микроскоп FEI Inspect S50, микротвердомер ПМТ-3, дифрактометр Empyrean с вакуумной камерой Anton Paar НТК 1200N.

Сравнительная оценка ресурса выпускного клапана с упрочняющим покрытием проводилась по результатам экспериментальной отработки двух образцов – серийного и упрочненного на стенде, представленном на рис. 2. Методика и программа ресурсных испытаний выпускных клапанов ГРМ представлена в работе [8], основанной на результатах исследований, приведенных в [3, 4].



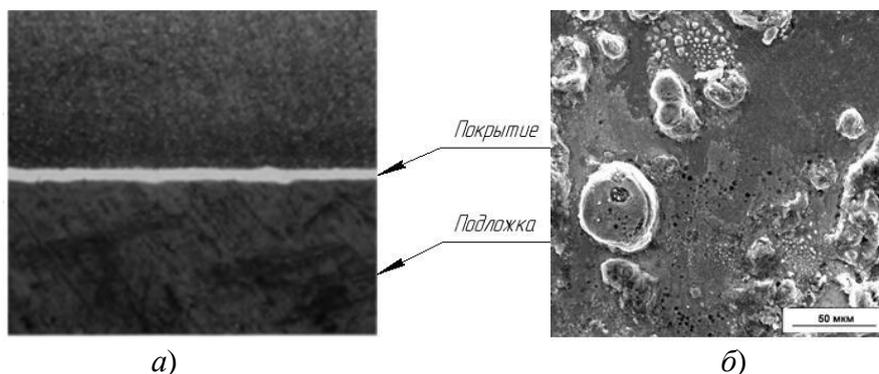
1 – рама, 2 – регулируемый по высоте стол, 3 – подъемный механизм, 4 – асинхронный электродвигатель, 5 – кулачковый привод толкателя, 6 – толкатель, 7 – выпускной клапан, 8 – головка блока цилиндров, 9 – струбцина, 10 – фен промышленный, 11 – горелка газовая, 12 – магнитный пускатель, 13 – терморегулятор, 14 – баллон газовый

Рисунок 2 – Стенд для ресурсных испытаний выпускных клапанов ГРМ

### 3 Результаты исследований

Для исследований физико-механических характеристик были использованы лабораторные образцы в виде дисков из материала, соответствующего тарелке выпускного клапана, на поверхность которых наносилось покрытие. По результатам исследований было определено, что среднее значение коэффициента сухого трения для упрочняющего покрытия в паре с серым чугуном составил 0,12, что на 30 % ниже в сравнении с покрытием, применяемым в серийных клапанах. Аналогичный результат был получен и для интенсивности изнашивания, среднее значение которого составило  $6 \cdot 10^{-7}$  г/м.

В результате металлографического анализа были получены снимки поперечного сечения микрошлифа и снимки поверхности образца, которые представлены на рис. 3.



а) снимок поперечного сечения микрошлифа, б) снимок поверхности микрошлифа

Рисунок 3 – Результаты металлографического анализа

Данные исследования позволили определить, что среднее значение толщины упрочняющего покрытия составило 40 мкм, при этом в поперечном сечении не наблюдаются отслоения, трещины и иные дефекты. По снимкам, полученным на электронном микроскопе

(рис. 3, б), было сделано заключение об отсутствии поверхностных дефектов, а также о наличии в структуре включений карбида кремния и диоксида циркония.

Исследования, выполненные на микротвердомере ПМТ-3, позволили определить, каким образом изменяется микротвердость упрочняющего покрытия по толщине слоя. Результаты представлены на рис. 4.

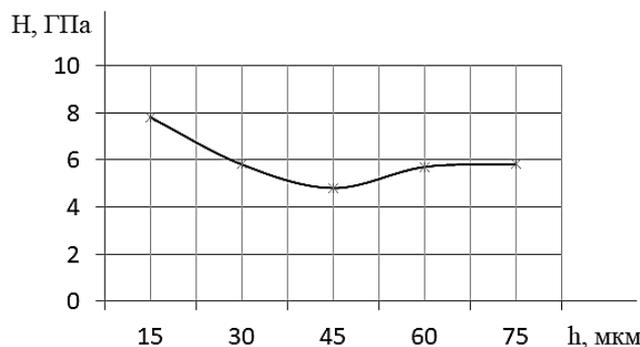


Рисунок 4 – Результаты исследований микротвердости упрочняющего покрытия

Из графика (рис. 4) видно, что среднее значение микротвердости покрытия составило 6,3 ГПа, что на 20...25 % выше, чем у покрытий, используемых на серийных клапанах. Данное значение микротвердости позволяет упрочняющему покрытию лучше сопротивляться износу в результате воздействия твердых загрязняющих частиц.

Рентгеноструктурный фазовый анализ проводился при диапазоне температур от 25 °С до 900 °С. В результате анализа было определено, что все компоненты покрытия находятся в аморфном состоянии во всем диапазоне температур. Это говорит о высокой стабильности параметров упрочняющего покрытия, так как при увеличении температуры эксплуатации до 900 °С не будут происходить фазовые превращения, влияющие на структуру покрытия.

После оценки результатов исследований физико-механических параметров покрытия были подготовлены выпускные клапаны с упрочняющим покрытием и серийные клапаны газового двигателя КАМАЗ 820.60, которые подверглись стендовым испытаниям. В результате стендовых испытаний, длившихся 200 ч для каждого клапана, были составлены графики изменения ширины пояска приработки от наработки (рис. 5).

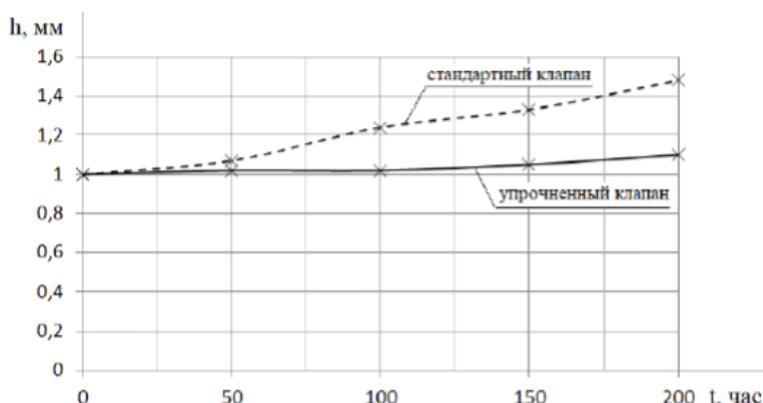


Рисунок 5 – Результаты стендовых испытаний выпускных клапанов ГРМ

Затем была проведена аппроксимация экспериментальных данных, по результатам которой составлен прогноз наработки клапанов до предельного состояния ширины пояска 2 мм. Результаты исследований показали, что интенсивность износа серийного клапана в 2 раза выше, чем у клапана с упрочняющим покрытием.

#### 4 Обсуждение и заключение

В данной работе описана методика упрочнения деталей двигателей внутреннего сгорания на примере выпускных клапанов ГРМ газовых двигателей. Выполнены исследования физико-механических характеристик упрочняющего покрытия на основе никеля с добавлением карбида кремния и диоксида циркония. Сравнительный анализ результатов лабораторных исследований показал, что упрочняющее покрытие имеет на 20...30 % лучшие характеристики в сравнении с покрытием рабочей фаски выпускных клапанов, изготавливаемых серийно. Положительная динамика также наблюдалась при выполнении ресурсных испытаний, в результате которых было определено, что интенсивность изнашивания выпускного клапана с упрочняющим покрытием в 2 раза меньше, чем у серийного клапана. Однако в реальных условиях данная разница может быть несколько меньше, так как при стендовых испытаниях не имитировался ряд факторов, например давление в камере сгорания.

Описанная в данной работе методика может быть применена не только для упрочнения выпускных клапанов ГРМ, но и в других узлах двигателей. Например, в работе [10], подобная методика была успешно применена при восстановлении валов роторов турбокомпрессоров.

#### Список литературы

- 1 Алисин, В. В. Износостойкое металлокерамическое покрытие с ультрадисперсной упрочняющей фазой для узлов трения, содержащих кристаллы диоксида циркония / В. В. Алисин // *Journal of Advanced Research in Natural Science*. – 2019. – №. 7. – С. 10-14.
- 2 Восстановление и упрочнение рабочей фаски клапана двигателя внутреннего сгорания методом селективной лазерной наплавки (SLM) / К. Г. Волков, А. Г. Ипатов, Е. В. Харанжевский, С. Н. Шмыков // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. – 2022. – № 9. – С. 20-26.
- 3 Гоц, А. Н. Выбор режимов ускоренных испытаний головки цилиндров автомобильного дизеля / А. Н. Гоц, В. С. Клевцов // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2018. – № 2. – С. 26-33.
- 4 Гоц, А. Н. Методика расчета теплонапряженного состояния головки цилиндров дизеля жидкостного охлаждения / А. Н. Гоц, В. С. Клевцов // *Современные наукоемкие технологии*. – 2020. – № 5. – С. 26-32.
- 5 Драгуленко, В. В. Детонационные явления в современных форсированных бензиновых двигателях внутреннего сгорания / В. В. Драгуленко, А. А. Бондаренко // *Наука, образование, молодежь: горизонты развития: Сборник трудов по материалам Национальной научно-практической конференции, Керчь, 10 марта 2021 года / Под общей редакцией Е.П. Масюткина, науч. редактор Т.Н. Попова*. – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». – 2021. – С. 18-23.
- 6 Жуковец, И. И. Механические испытание металлов / И. И. Жуковец. – М.: Высшая школа. – 1980. – 191 с.
- 7 Засыпкин, А. Д. Упрочнение пальцев траков гусеничных машин ВТМО винтовым обжатием / А. Д. Засыпкин, В. Б. Дементьев // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2012. – № 4. – С. 37-39.
- 8 Исследование работоспособности упрочненных клапанов ДВС / А. Г. Ипатов, П. В. Дородов, С. Н. Шмыков [и др.] // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2023. – № 1(73). – С. 48-53.
- 9 К вопросу определения фактической наработки двигателей внутреннего сгорания / С. В. Мальчиков, М. А. Сватков, И. М. Колесников, И. М. Блянкинштейн // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. – 2018. – № 2. – С. 84-89.
- 10 Малинин, А. В. Влияние антифрикционных керамических покрытий в подшипниковых сопряжениях на эффективность работы турбокомпрессора / А. В. Малинин, А. Г. Ипатов, С. Н. Шмыков // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2023. – № 2(74). – С. 71-75.

11 Марков, В. А. Сравнительный анализ альтернативных моторных топлив для дизелей / В. А. Марков, Е. В. Бебенин, С. П. Гладышев // Известия вузов. Машиностроение. – 2014. – №5(650). – С. 43 – 48.

12 Методика и результаты трибологических исследований смесового рыжико-минерального топлива / А. П. Уханов, В. А. Мачнев, Е. Г. Ротанов [и др.] // Наука в центральной России. – 2019. – № 2(38). – С. 108-116.

13 ООО «Газпром газомоторное топливо»: сайт. Санкт-Петербург, 2023. URL: <https://gmt.gazprom.ru/about/avtomobilnoe-toplivo-ecogas/> (дата обращения 17.09.2023).

14 Патент № 2320731 С2 Российская Федерация, МПК С21D 8/00. Способ высокотемпературной термомеханической обработки цилиндрических заготовок переменного сечения и устройство для его реализации : № 2006113895/02 : заявл. 24.04.2006 : опубл. 27.03.2008 / В. Б. Дементьев, А. Д. Засыпкин ; заявитель Институт прикладной механики УрО РАН.

15 Посметьев, В. И. Оценка эффективности перспективной комбинированной технологии для восстановления шеек коленчатых валов двигателей лесовозных автопоездов / В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, В. О. Никонов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2021. – Т. 4, № 4(38). – С. 86-101.

16 Русаков, А. А. Рентгенография металлов / А. А. Русаков. – Москва: Атомиздат, 1977. – 480 с.

17 Скрябин, В. А. Металлографический анализ образцов из порошковых материалов / В. А. Скрябин, А. Е. Зверовщиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2019. – № 3. – С. 33-36.

18 Упрочнение деталей газораспределительного механизма двигателей внутреннего сгорания гальваническим покрытием / Ю. П. Гнездилова, А. И. Перьков, В. В. Каменев, И. А. Демидова // Молодежная наука - гарант инновационного развития АПК : материалы X Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Курск, 19–21 декабря 2018 года. Том Часть 3. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия. – 2019. – С. 273-277.

19 Федеральная служба государственной статистики: сайт. Москва, 2023. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/131\\_23-08-2023.html](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/131_23-08-2023.html) (дата обращения 17.09.2023).

20 Шиганов, И. Н. Модифицирование поверхности алюминиевых сплавов карбидами кремния методом лазерного оплавления / И. Н. Шиганов, П. Е. Самарин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – №. 6 (6). – С. 4–11.

21 Tribological performance of boron-based superhard coatings sliding against different materials / E. V. Kharanzhevskiy [et al.] // Wear. – 2021. – Т. 477. – С. 203 – 835.

## References

1 Alisin, V.V. Wear-resistant metal-ceramic coating with an ultradispersed strengthening phase for friction units containing zirconium dioxide crystals / V.V. Alisin // Journal of Advanced Research in Natural Science. – 2019. – No. 7. – pp. 10-14.

2 Restoration and strengthening of the working chamfer of an internal combustion engine valve using selective laser cladding (SLM) / K. G. Volkov, A. G. Ipatov, E. V. Kharanzhevsky, S. N. Shmykov // Repair. Recovery. Modernization. – 2022. – No. 9. – P. 20-26.

3 Gots, A. N. Selection of modes for accelerated testing of the cylinder head of an automobile diesel engine / A. N. Gots, V. S. Klevtsov // Tractors and agricultural machines. – 2018. – No. 2. – P. 26-33.

4 Gots, A. N. Methodology for calculating the heat-stressed state of the cylinder head of a liquid-cooled diesel engine / A. N. Gots, V. S. Klevtsov // Modern science-intensive technologies. – 2020. – No. 5. – P. 26-32.

5 Dragulenko, V. V. Detonation phenomena in modern forced gasoline internal combustion engines / V. V. Dragulenko, A. A. Bondarenko // Science, education, youth: development horizons: Collection of papers based on the materials of the National Scientific and Practical Conference, Kerch

, March 10, 2021 / Under the general editorship of E.P. Masyutkina, scientific editor T.N. Popova. – Kerch: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kerch State Marine Technological University”. – 2021. – pp. 18-23.

6 Zhukovets, I. I. Mechanical testing of metals / I. I. Zhukovets. – M.: Higher school. – 1980. – 191 p.

7 Zasyupkin, A.D. Strengthening the track fingers of VTMO tracked vehicles by screw compression / A.D. Zasyupkin, V.B. Demytyev // Tractors and agricultural machines. – 2012. – No. 4. – P. 37-39.

8 Study of the performance of reinforced internal combustion engine valves / A. G. Ipatov, P. V. Dorodov, S. N. Shmykov [etc.] // Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy. – 2023. – No. 1(73). – pp. 48-53.

9 On the issue of determining the actual operating time of internal combustion engines / S. V. Malchikov, M. A. Svatkov, I. M. Kolesnikov, I. M. Blankinshtein // Intellect. Innovation. Investments. – 2018. – No. 2. – P. 84-89.

10 Malinin, A.V. The influence of antifriction ceramic coatings in bearing matings on the efficiency of a turbocharger / A.V. Malinin, A.G. Ipatov, S.N. Shmykov // Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy. – 2023. – No. 2(74). – pp. 71-75.

11 Markov, V. A. Comparative analysis of alternative motor fuels for diesel engines / V. A. Markov, E. V. Bebenin, S. P. Gladyshev // News of universities. Mechanical engineering. – 2014. – No. 5 (650). – P. 43 – 48.

12 Methods and results of tribological studies of mixed camelina-mineral fuel / A. P. Ukhanov, V. A. Machnev, E. G. Rotanov [etc.] // Science in Central Russia. – 2019. – No. 2(38). – pp. 108-116.

13 Gazprom Gas Engine Fuel LLC: website. St. Petersburg, 2023. URL: <https://gmt.gazprom.ru/about/avtomobilnoe-toplivo-ecogas/> (access date 09.17.2023).

14 Patent No. 2320731 C2 Russian Federation, IPC C21D 8/00. Method of high-temperature thermomechanical processing of cylindrical blanks of variable cross-section and device for its implementation: No. 2006113895/02: application. 04/24/2006: publ. 03/27/2008 / V. B. Demytyev, A. D. Zasyupkin; applicant Institute of Applied Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

15 Posmetyev, V.I. Assessing the effectiveness of a promising combined technology for restoring the crankshaft journals of engines of timber road trains / V.I. Posmetyev, A.M. Kadyrmetov, V.O. Nikonov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2021. – T. 4, No. 4(38). – P. 86-101.

16 Rusakov, A. A. Radiography of metals / A. A. Rusakov. – Moscow: Atomizdat, 1977. – 480 p.

17 Skryabin, V. A. Metallographic analysis of samples from powder materials / V. A. Skryabin, A. E. Zverovshchikov // All materials. Encyclopedic reference book. – 2019. – No. 3. – P. 33-36.

18 Strengthening parts of the gas distribution mechanism of internal combustion engines with galvanic coating / Yu. P. Gnezdilova, A. I. Perkov, V. V. Kamenev, I. A. Demidova // Youth science - a guarantor of innovative development of the agro-industrial complex: materials of the X All-Russian (national) scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists, Kursk, December 19–21, 2018. Volume Part 3. – Kursk: Kursk State Agricultural Academy. – 2019. – pp. 273-277.

19 Federal State Statistics Service: website. Moscow, 2023. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/131\\_23-08-2023.html](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/131_23-08-2023.html) (access date 09/17/2023).

20 Shiganov, I. N. Modification of the surface of aluminum alloys with silicon carbides using the laser melting method / I. N. Shiganov, P. E. Samarin // Engineering journal: science and innovation. – 2012. – No. 6 (6). – P. 4–11.

21 Tribological performance of boron-based superhard coatings sliding against different materials / E. V. Kharanzhevskiy [et al.] // Wear. – 2021. – T. 477. – P. 203 – 835.