

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛЬЮ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ПОРШНЕВЫХ ПАЛЬЦЕВ ДВИГАТЕЛЯ

Эдуард Станиславович Савенко¹, Сергей Анатольевич Матвиенко²,
Дмитрий Владимирович Попов³, Людмила Филипповна Жданова⁴,
Игорь Олегович Пчелкин⁵

^{1,2,3,4,5} Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия,

¹e.s.savenko@donnasa.ru, ²s.a.matvienko@donnasa.ru, ³v.popov@donnasa.ru,

⁴l.p.zhdanova@donnasa.ru, ⁵pchelkin.i.o-zaahm-55a@donnasa.ru

Аннотация. В статье предложен метод усовершенствования технологии восстановления поршневых пальцев двигателей внутреннего сгорания методом пластического деформирования металла с использованием энергии высоковольтного импульсного разряда в жидкости – электрогидравлический эффект. В статье рассмотрены вопросы взаимодействия ударной волны с обрабатываемой деталью, уравнения движения цилиндрической оболочки, определена отраженная волна распространяющуюся в замкнутом ограниченном объеме. Предложено решение волнового уравнения. Разработана математическая модель процесса электроразряда при восстановлении поршневых пальцев. Способом электрогидравлической раздачи можно восстанавливать не только стальные, но и чугунные детали крышки подшипников ведущего вала коробки передач автомобиля, изготовленной из ковкого чугуна. Приведенные примеры подтверждают большие технологические возможности восстановления деталей способом электрогидравлической раздачи.

Ключевые слова: восстановление, поршневой палец, электрогидравлическая раздача, износ, ремонтный размер, электроразряд, пластическое деформирование металла, электромагнитная энергия, энергия взрывчатых веществ

Для цитирования: Взаимодействие ударной волны с обрабатываемой деталью в процессе электроразряда при восстановлении поршневых пальцев двигателя / Э. С. Савенко [и др.]. // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2025. Выпуск 2025-3(173) Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. С. 14–22. doi: 10.71536/vd.2025.3c173.2. edn: qkgetp.

Original article

THE INTERACTION OF THE SHOCK WAVE WITH THE WORKPIECE DURING ELECTRICAL DISCHARGE DURING THE REWORKING OF THE PISTON PINS OF THE ENGINE

Eduard S. Savenko¹, Sergey A. Matvienko², Dmitry V. Popov³, Lyudmila P. Zhdanova⁴,
Igor O. Pchelkin⁵

^{1,2,3,4,5} Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia,

¹e.s.savenko@donnasa.ru, ²s.a.matvienko@donnasa.ru, ³v.popov@donnasa.ru,

⁴l.p.zhdanova@donnasa.ru, ⁵pchelkin.i.o-zaahm-55a@donnasa.ru

Abstract. The paper proposes a method for improving the technology of reworking piston pins of internal combustion engines by plastic deformation of metal using the energy of a high-voltage pulsed discharge in a liquid known as the electrohydraulic effect. The paper discusses the interaction of a shock wave with a machined part, the equations of motion of a cylindrical shell, and defines a reflected wave propagating in a closed and limited



volume. A solution to the wave equation is proposed as well. A mathematical model of the electrical discharge process during the reworking of piston pin is represented. It is possible to rebuild not only steel but also cast-iron parts of the bearing cap of the transmission gear shaft made of ductile iron by electrohydraulic distribution. The abovementioned examples confirm the great technological possibilities of reworking parts by electrohydraulic distribution.

Keywords: reworking, piston pin, electrohydraulic distribution, tearing, repair size, electric discharge, plastic deformation of metal, electromagnetic energy, energy of explosives

For citation: The interaction of the shock wave with the workpiece during electrical discharge during the reworking of the piston pins of the engine/ E. S. Savenko [et al.]. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Buildings and structures using new materials and technologies*. 2025;3(173):14–22. (In Russ.). doi: 10.71536/vd.2025.3c173.2. edn: qkgetp.

ВВЕДЕНИЕ

Ремонт автотранспортных средств связан со значительными затратами материальных ресурсов. Предприятия машиностроения почти 40 % металла расходуют на изготовление запасных частей, которые и определяют себестоимость ремонта машин.

Применение нового высокоэнергетического способа пластического деформирования металла с использованием электромагнитной энергии, энергии взрывчатых веществ и энергии высоковольтного импульсного разряда в жидкости – электрогидравлического эффекта (ЭГЭ) и на его основе электрогидравлической обработки.

Высокоэнергетические способы характеризуются не только количеством затрачиваемой энергии, но и высокой скоростью деформации, влияющей как на поведение металлов в процессе деформирования, так и на их физико-механические свойства. Отличительной особенностью этих способов является невысокая стоимость потребляемой энергии, простота оснастки, высокая эффективность воздействия на изделие [1–4].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Электрогидравлический эффект, впервые предложенный советским инженером Л. А. Юткиным, представляет собой трансформацию электрической энергии в механическую работу без промежуточных механических звеньев, что позволяет широко использовать его для разнообразных промышленных целей. Сущность процесса состоит в том, что при создании в жидкости специально сформированного высоковольтного электрического разряда в зоне последнего развиваются высокие гидравлические давления [5–7].

Исследования при этом показали, что выбор параметров электроразряда даже для одного вида изделия сложен и зависит как от геометрических параметров детали, так и от применяемого материала и термообработки. Необоснованный выбор параметров электроразряда может привести к разрушению деталей в процессе восстановления или созданию скрытых дефектов, которые могут проявиться в процессе работы [8; 10].

Как видно из приведенного анализа, достаточно надежного, универсального способа для восстановления всех видов поршневых пальцев ДВС не имеется, и поэтому необходимо проведение дальнейших работ по исследованию и разработке технологии их восстановления.

Опытная проверка использования электрогидравлической обработки установила ряд преимуществ ее перед методами, использующими в качестве источника энергии взрывчатые вещества в режиме взрывного химического превращения. Это такие преимущества, как возможность управления процессом накопления и выделения энергии, отсутствие источников повышенной опасности после отключения установки, простота и низкая себестоимость оснастки, которые значительно сокращают сроки внедрения электрогидравлической обработки в производство [11; 12].

ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Целью работы является разработать математическую модель процесса электрогидравлической раздачи при восстановлении поршневых пальцев.

Задачи работы:

– разработать математическую модель процесса электроразряда при восстановлении поршневых пальцев;

- определено взаимодействие ударной волны с обрабатываемой деталью;
- линейные уравнения движения в цилиндрической оболочке;
- определена ударная волна с экспоненциальным профилем спада давления;
- рассмотрено граничное условие на ударном фронте (поверхность между жидкостью и плазмой);
- определено уравнения движения оболочки и нормального перемещения составляющей давления;
- определен потенциал, расходящийся цилиндрической волны и рассмотрено гидродинамического давления на внутренней поверхности детали.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

Технологии восстановления поршневых пальцев рассматривает (использование иницирующей проволоки весом $\geq 0,1-0,3$ г) предполагает, что плазма образуется из металлической проволоки. В используемой электрогидравлической установке генерируется низкотемпературная плазма, для которой число частиц $n \approx 10^{25}-10^{28} \text{ м}^{-3}$, температура $T = 5\,000-50\,000 \text{ }^\circ\text{K}$, причем энергия притяжения между электронами и ионами $e^2 n_e^{-1/3}$ сравнима с кинетической $\kappa T = 1/\beta$, $e^2 n_e^{-1/3} \beta \leq 0,5$.

Взаимодействие ударной волны с обрабатываемой деталью. В плазме в момент времени $t = 0$ возникает ударная волна и, распространяясь в жидкости, в момент времени $t = t_0$ достигает детали, в результате чего происходит ее деформирование.

Выберем цилиндрическую систему координат r, z, θ и ось z совместим с осью детали. Для детали, имеющей форму цилиндрической оболочки (толщиной h и радиуса $r_0 = a$) введем обозначения: u, v, w – перемещения срединной поверхности радиуса $r_0 = a$.

Линейные уравнения движения цилиндрической оболочки можно записать в виде [14].

$$\begin{aligned} Z_1(u, v, w) &= \frac{1-v^2}{E} \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ Z_2(u, v, w) &= \frac{1-v^2}{E} \rho_0 \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ Z_3(u, v, w) &= \frac{1-v^2}{E} \rho_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + p(z, \theta, t), \end{aligned} \quad (1)$$

где обозначены дифференциальные операторы

$$\begin{aligned} Z_1(u, v, w) &= \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1-v}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{a^2 \partial \theta^2} + \frac{1+v}{2a} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial \theta} - \frac{v}{a} \cdot \frac{\partial w}{\partial z}, \\ Z_2(u, v, w) &= \frac{1+v^2}{2a} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial \theta} + \frac{1-v^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v}{a^2 \partial \theta^2} - \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial w}{\partial \theta}, \\ Z_3(u, v, w) &= \frac{v}{a} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{a^2} - \frac{h^2}{12} \nabla^2 \nabla^2 w, \end{aligned} \quad (2)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа в цилиндрической системе координат,

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

E – модуль упругости материала детали,

ν – коэффициент Пуассона материала детали,

ρ_0 – плотность материала детали,

$P(z, \theta, t)$ – нормальная нагрузка от действия ударной волны.

Из общих уравнений движения идеальной жидкости и состоящих из уравнения Эйлера

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{V} \text{ grad}) \vec{V} + \text{grad} p = 0, \quad (3)$$

уравнения неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \vec{V} = 0, \quad (4)$$

и уравнения состояния $p = f(\rho)$, записанного в форме Тэта

$$\frac{p+B}{\rho^k} = \frac{p_0+B}{\rho_0^k}; B = const; k = 7.15, \quad (5)$$

следует волновое уравнение относительно скорости движения частиц среды

$$\nabla^2 \vec{V} - \frac{1}{C^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial t^2} = 0. \quad (6)$$

В соотношениях (1) – (6) ρ – плотность жидкости, p – давление в жидкости, C – скорость звука в жидкости.

Введем в рассмотрение потенциальную функцию ϕ , связанную с вектором скорости формулой

$$\vec{V} = grad \phi, \quad (7)$$

и удовлетворяющую волновому уравнению

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{C^2} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0, \quad (8)$$

Давление определяется через волновой потенциал ϕ посредством соотношения

$$p = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t}. \quad (9)$$

На границе Γ жидкости с деформируемой деталью граничное условие заключается в равенстве нормальных скоростей тела и жидкости и имеет вид

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial r} \right|_{\Gamma(r=a)} = \pm \frac{\partial w}{\partial t}, \quad (10)$$

где w – нормальное перемещение точек поверхности детали, знак «+» выбирается при совпадении положительного направления с направлением внешней нормали, знак «-» – в противоположном направлении.

Для отраженных волн, распространяющихся в замкнутом ограниченном объеме, волновой потенциал должен быть ограничен в начале координат:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \phi = finit. \quad (11)$$

Граничное условие на ударном фронте (поверхность между жидкостью и плазмой) может быть задана в виде соотношений между скоростью движения жидкости V , скоростью звука C и скоростью движения ударного фронта D [15].

$$D = \frac{V}{2} + \frac{1}{k+1} \cdot \frac{c^2 - c_0^2}{V},$$

$$C = \left[c_0^2 + \frac{k-1}{2} \cdot V \cdot \sqrt{4c_0^2 + \left(\frac{k+1}{2} \cdot V \right)^2} + \left(\frac{k-1}{2} \cdot V \right) \right]^{1/2}, \quad (12)$$

где C_0 – скорость звука в покоящейся жидкости.

Решение волнового уравнения (8) должно удовлетворять соответствующим начальным условиям. Для рассматриваемой задачи – это нулевые начальные условия

$$\phi|_{t=0} = 0,$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial t} \right|_{t=0} = 0. \quad (13)$$

Решение краевой задачи (1) – (13) может быть проведено методом неполного разделения переменных, когда искомое решение по одной координате определяется в виде ряда по собственным функциям соответствующей краевой задачи, затем с помощью одностороннего интегрального преобразования Лапласа из уравнения исключается время и в пространстве изображения проводится окончательное разделение переменных или решение обыкновенного дифференциального уравнения.

Одностороннее преобразование Лапласа функции $f(t)$ задается с помощью интегральной формулы

$$f^L(S) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt, \quad (14)$$

где S – комплексный параметр преобразования. Индекс L указывает на результат применения преобразования Лапласа к функции $f(t)$.

Функцию $f^L(S)$ обычно называют изображением функции $f(t)$ функцию $f(t)$ – оригиналом функции $f^L(S)$.

Обратное преобразование Лапласа имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\varepsilon - i\infty}^{\varepsilon + i\infty} e^{st} f^L(s) ds, \quad (15)$$

где контур интегрирования проходит справа от особых точек подынтегральной функции $f^L(S)$.

В связи с математическими трудностями обратное преобразование Лапласа не всегда удастся провести точно. В этих случаях приходится прибегать к асимптотическим или численным методам.

Преобразуем уравнения движения оболочки (1) к виду, более удобному для исследования.

Ввиду плоской симметрии действия нестационарных волн в полости детали компонента перемещения $V = 0$; остальные компоненты перемещений и давление в жидкости p представим в виде рядов по тригонометрическим функциям и применим к уравнениям движения оболочек интегральное преобразование Лапласа по t с параметром S при нулевых начальных условиях.

$$\begin{aligned} w(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} w_n(t) \cdot \cos n\theta, \\ u(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} u_n(t) \cdot \sin n\theta, \\ p(r, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} p_n(r, t) \cdot \cos n\theta. \end{aligned} \quad (16)$$

Результат преобразования обозначим верхним индексом L . Тогда из уравнения (1) можно получить соотношение, связывающее в пространстве изображений n -ю составляющую нормального перемещения с n -ой составляющей давления

$$m(n, s) w_n^L = N(n, s) P_n^L(a), \quad (17)$$

здесь M и N – алгебраические полиномы от n , S зависящие также от упругих и инерционных свойств материала детали.

Конкретные выражения полиномов M и N для различных теорий оболочек приведены в монографии [16]. Для уравнений движения оболочек (1) имеем

$$\begin{aligned} M(o, s) &= 1 + s^2 c_2^{-2}, \\ M(n, s) &= \frac{1}{12} \left(\frac{h}{a} \right)^2 n^2 (n^2 - 1) + s^2 c_2^{-2}, \\ M(n, s) &= m^{-1} c_2^{-2}, C_2^2 = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \rho_0 c_0^2, m = \rho_0 h (\rho a)^{-1}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $r = a$ – внутренний диаметр детали,
 C_0 – скорость распространения звука в материале детали.

Пусть однородный линейный источник нестационарных возмущений (плазменный шнур) параллелен оси цилиндра и проходит через точку $O_1(o_1, o, o)$ поперечного сечения полости. Поскольку интенсивность источника давлений равномерна вдоль оси z рассмотрим плоскую задачу.

Применив преобразование Лапласа к (8) и (10) получим краевую задачу в изображениях:

$$\frac{\partial^2 \varphi^L}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi^L}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi^L}{\partial \theta^2} - s^2 \varphi^L = 0, \left. \frac{\partial \varphi^L}{\partial r} \right|_{r=a} = w_n^L. \quad (19)$$

Потенциалы цилиндрических волн можно также рассматривать с помощью интегрального преобразования Лапласа по времени.

В пространстве изображений по Лапласу потенциал, расходящийся цилиндрической волны можно записать в виде

$$\varphi^L = F^L(s)K_0(sr), \quad (20)$$

Здесь $F^L(s)$ – функция, определяющая профиль эпюры давления.

Давление в изображениях имеет вид

$$p^L = -\rho cs F^L(s)K_0(sr), \quad (21)$$

где $K_0(sr)$ – цилиндрическая функция Макдональда (модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого индекса).

ВЫВОДЫ

1. Анализ изменения $p(t)$ показывает, что в начальный момент взаимодействия давление на внутренней поверхности детали при действии ударной волны удваивается. В последующие моменты времени вследствие многократного наложения отраженных волн, а также развитого течения среды наблюдается скачкообразное изменение давления.
2. Нестационарное радиальное перемещение стенки детали является интегральной характеристикой давления, поэтому его нарастание во времени происходит более плавно.
3. Определено граничное условие на ударном фронте (поверхность между жидкостью и плазмой);
4. Определено уравнения движения оболочки и нормального перемещения составляющей давления.
5. Определен потенциал, расходящийся цилиндрической волны и рассмотрено гидродинамического давления на внутренней поверхности детали.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Allmaier H., Sander D., Reich F. Measuring friction in automotive engines & determining the contributions of the individual subsystems // 5th World Tribology Congress, WTC, Italy, 8-13 September 2013: Vol. 2. Italy: Politecnico di Torino (DIMEAS), 2013. P. 117
2. Матвиенко С. А. Анализ особенностей влияния эксплуатационных факторов на деталь // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: сб. материалов междунар. научно-техн. конф. (Петропавловск-Камчатский, 17-19 октября 2019 г.): в 2-х частях. Петропавловск-Камчатский: Камчатский гос. техн. ун-т, 2019. С. 102-105. Ч. 2. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38537341&pff=1> (дата обращения: 07.02.2025). EDN OBAPFG.
3. Постановка задачи определения полного технического ресурса автотранспортных средств / С. А. Матвиенко [и др.]. // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2024. Вып. 2024-4(168) Научно-технические достижения студентов строительно-архитектурной отрасли. С. 15-20. URL: [https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2024/2024-4\(168\)/st_03_matvienko_baydak_podorvanov_lata.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2024/2024-4(168)/st_03_matvienko_baydak_podorvanov_lata.pdf) (дата обращения: 11.02.2025). ISSN 2519-2817.
4. Дудан А. В., Агеев М. С., Рутковский А. В. Исследование процесса вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда. Построение математической модели процесса // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение. 2020. N 4. С. 40-48.
5. Method For Determination of Liquefied Gas Fuel Consumption and Harmful Emissions of Vehicles / I. Gritsuk [et al.]. // Operation, Fuels And Safety. Seria: Mechanical Engineering (Inżynieria Mechaniczna) Transport Means Engineering. 2022. Selected Issues. Rzeszow University of Technology. P. 37-44. ISBN 978-83-7934-606-6.
6. Быков И. А., Кузнецов Т. А. Изготовление заготовок поршневых пальцев в автомобильной промышленности // Автомобильное производство. 1984. N 1. С. 4-7.
7. Application of Combined Electric Arc Coatings for Parts and Units of Vehicles Recovery in Repair Technologies / M. Ahieiev [et al.]. // SAE Technical Paper 2021-01-5100. 2021. doi: 10.4271/2021-01-5100. 1-17 p.
8. Research of the Gas Fuel Supply Process on the Compression Stroke in Ship's Low / Ie. Bilousov [et al.]. // Speed Gas - Diesel Engines. SAE Technical Paper 2020-01-2107. 2020. P. 1-12. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2107>.
9. Полупанов Ф. П., Балан К. Г., Пономаренко В. Н. Электрогидравлический эффект в ремонтном деле // Техника в сельском хозяйстве. 1972. N 12. С. 72-74.
10. Каспарьянц А. Г., Какуевичкий В. А. Использование электрогидравлического эффекта для восстановления поршневых пальцев // Автомобильный транспорт. 1982. N 8. С. 103-106.

11. Влияние параметров способа электрогидравлической раздачи на эффективность деформации и изменение физических свойств поршневых пальцев ДВС / Э. С. Савенко [и др.]. // Современное промышленное и гражданское строительство. 2023. Т. 19, N 4. 175-182 с. URL: http://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2024/st_05_savenko_gaevoy_filimonov_savelyev_shkilnyuk.pdf (дата обращения: 09.01.2024).
12. Моделирование процесса электроразряда при восстановлении поршневых пальцев ДВС / Э. С. Савенко [и др.]. // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, N 2. С. 242-255. URL: <https://elibrary.ru/INTOCP> (дата обращения: 09.01.2024). DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-2-242-255. EDN INTOCP.
13. Технология применения способа электрогидравлической раздачи для восстановления деталей // Э. С. Савенко [и др.]. // Современное промышленное и гражданское строительство. 2024. Т. 20, N 1. С. 15-24. URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2024-1/st_02_savenko_matvienko_simonov_belanov_gudolin.pdf (дата обращения: 09.01.2024). EDN THWWAI.
14. Improving the Processes of Thermal Preparation of an Automobile Engine with Petrol and Gas Supply Systems (Vehicle Engine with Petrol and LPG Supplying Systems) / I. Gritsuk [et al.]. // SAE Technical Papers. 2020. 2020-01-2031. P. 1-13. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2031>.
15. Improving Fuel Economy of Spark Ignition Engines Applying the Combined Method of Power Regulation / Y. Gutarevych [et al.]. // Energies. 2020. Vol. 13(5). P. 1-20. <https://doi.org/10.3390/en13051076>.
16. Research of vehicle control informative functioning capacity / I. Kuric [et al.]. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering: 24th Slovak-Polish International Scientific Conference on Machine Modelling and Simulations - MMS 2019 (Liptovský Ján, Slovakia, 3-6 September 2019). Liptovský Ján, 2020. Vol. 776(1). P. 1-11. DOI 10.1088/1757-899X/776/1/012036.

REFERENCES

1. Allmaier, H., Sander, D. and Reich, F. (2013), "Measuring Friction in Automotive Engines & Determining the Contributions of the Individual Subsystems, 5th World Tribology Congress, WTC, Italy, 8-13 September 2013, pp. 117.
2. Matvienko, S.A. (2019), "Analysis of the Impact of Operational Factors on a Detail", *sb. materialov mezhdunar. nauchno-techn. konf.* [collection of materials of the international scientific and technical conf.], *Texnicheskaya e'kspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya* [Technical operation of water transport: problems and development paths], Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 17-19 October 2019, pp. 102-105, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38537341&pff=1> (Accessed 7 February 2025). EDN OBAPFG.
3. Matvienko, S.A., Baydak, I.A., Podorvanov, A.M. and Lata, S.A. (2024), "Setting the Task of Determining the Full Technical Vehicle Resource", *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, issue 2024-4(168) Scientific and technical achievements of students of the construction and architectural industry, pp. 15-20, available at: [https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2024/2024-4\(168\)/st_03_matvienko_baydak_podorvanov_lata.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2024/2024-4(168)/st_03_matvienko_baydak_podorvanov_lata.pdf) (Accessed 11 February 2025). EDN OBAPFG.
4. Dudan, A.V., Ageev, M.S. and Rutkovsky, A.V. (2020), "Investigation of the Process of Vacuum Thermocyclic Nitriding in Plasma of a Pulsating Glow Discharge", *Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences. Mechanical Engineering and Mechanical Engineering*, no. 4, pp. 40-48.
5. Gritsuk, I., Mateichyk, V., Volkov, V., Pohorletskyi, D. and Bulgakov, M. (2022), "Method for Determination of Liquefied Gas Fuel Consumption and Harmful Emissions of Vehicles", *Operation, Fuels And Safety*. Seria: Mechanical Engineering (Inżynieria Mechaniczna) Transport Means Engineering, Selected Issues, pp. 37-44. ISBN 978-83-7934-606-6.
6. Bykov, I.A. and Kuznetsov, T.A. (1984), "Manufacture of Piston Pin Blanks in the Automotive Industry, *Automotive Production*, no. 1, pp. 4-7.
7. Ahieiev, M., Gritsuk, I., Litikova, A., Bilousov, Ie., Vrublevskyi, R., Boboshko, O., Smyrnov, O., Saraieva, I., Khudiakov, I. and Pogorletsky, D. (2021), "Application of Combined Electric Arc Coatings for Parts and Units of Vehicles Recovery in Repair Technologies", *SAE Technical Paper 2021-01-5100*, pp. 1-17. DOI 10.4271/2021-01-5100,
8. Bilousov, Ie., Marchenko, A., Gritsuk, I., Savchuk, V., Bulgakov, N., Mitienkova, V., Ahieiev, M., Samarin, O., Vrublevskyi, R., Volodarets, M., Kalashnikov, Ye. and Pronin, S. (2020), "Research of the Gas Fuel Supply Process on the Compression Stroke in Ship's Low", *Speed Gas - Diesel Engines. SAE Technical Paper 2020-01-2107*, pp. 1-12. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2107>.
9. Polupanov, F.P., Balan, K.G. and Ponomarenko, V.N. (1972), "Electrohydraulic Effect in Repair Business", *Machinery in Agriculture*, no. 12, pp. 72-74.
10. Kasparyants, A.G. and Kakuyevitsky, V.A. (1982), "The Use of the Electrohydraulic Effect to Restore Piston Pins", *Automobile Transport*, no. 8, pp. 103-106.
11. Savenko, A.S., Gaevoy, D.D., Filimonov, D.V., Savelyev, D.S. and Shkilnyuk, D.A. (2023), "Influence of Parameters of the Electrohydraulic Distribution Method on the Efficiency of Deformation and Changes in the Physical Properties of Piston Pins of Internal Combustion Engines", *Modern Industrial and Civil Construction*, vol. 19, no. 4, pp. 175-182, available at: https://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2023-4/st_05_savenko_gaevoy_filimonov_savelyev_shkilnyuk.pdf (Accessed 9 January 2025). ISSN 1993-3495.
12. Savenko, E.S., Savenkov, N.V., Matvienko, S.A. and Kasparyants, A.G. (2024), "Electric Discharge Process Modeling when Piston Pins Recovery in Internal Combustion Engines", *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*,

- vol. 21, no. 2, pp. 242-255, available at: <https://elibrary.ru/IHTOCP> (Accessed 9 January 2025). DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-2-242-255. EDN IHTOCP.
13. Savenko, E.S., Matvienko, S.A., Simonov, V.V., Belanov, N.N. and Gudolin, A.G. (2024), "Technology of Applying the Method of Electrohydraulic Display for Parts Restoration", *Modern Industrial and Civil Engineering*, vol. 20, no. 1. pp. 15-24, available at: https://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2024-1/st_02_savenko_matvienko_simonov_belanov_gudolin.pdf (Accessed 9 January 2025). EDN THWWAI.
 14. Gritsuk, I., Pogorletsky, D., Mateichyk, V., Symonenko, R., Tsiuman, M., Volodarets, M., Bulgakov, N., Volkov, V., Vychuzhanin, V., Grytsuk, Yu., Ahieiev, M. and Sadovnyk, I. (2020), "Improving the Processes of Thermal Preparation of an Automobile Engine with Gasoline and Gas Supply Systems (an Automobile Engine with Gasoline and Liquefied Gas Supply Systems)", *SAE Technical Papers*, pp. 1-13. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2031>.
 15. Gutarevych, Y., Syrota, O., Shuba, Y., Mateichyk, V., Matijošius, J., Rimkus, A. and Gritsuk, I. (2020), "Improving Fuel Economy of Spark Ignition Engines Applying the Combined Method of Power Regulation", *Energies*, vol. 13(5), pp. 1-20. <https://doi.org/10.3390/en13051076>.
 16. Kuric, I., Gorobchenko, O.M., Litikova, O., Gritsuk, I., Mateichyk, V., Bulgakov, M. and Klačková, I. (2020), "Research of Vehicle Control Informative Functioning Capacity", 24th Slovak-Polish International Scientific Conference on Machine Modelling and Simulations – MMS 2019, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Liptovský Ján, Slovakia, 3-6 September 2019, vol. 776(1), pp. 1-11. DOI 10.1088/1757-899X/776/1/012036.

Информация об авторах

Савенко Эдуард Станиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: основы технологии производства и ремонта автомобилей.

Матвиенко Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: технология ремонта автомобилей.

Попов Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: технология ремонта автомобилей.

Жданова Людмила Филипповна – ассистент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: технология ремонта автомобилей.

Пчелкин Игорь Олегович – магистрант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: технология ремонта автомобилей.

Information about the authors

Savenko Eduard S. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of the Department of Automobile Transport, Service and Operation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: car repairing technology.

Matvienko Sergey A. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of the Department of Automobile Transport, Service and Operation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: car repairing technology.

Popov Dmitry V. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of the Department of Automobile Transport, Service and Operation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: car repairing technology.

Zhdanova Lyudmila P. – is an Assistant, of the Department of Automobile Transport, Service and Operation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: car repairing technology.

Pchelkin Igor O. – master's student, of the Department of Automobile Transport, Service and Operation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: car repairing technology.

Вклад авторов:

Савенко Э. С. – научное руководство; написание статьи.

Матвиенко С. А. – концепция исследования.

Попов Д. В. – итоговые выводы.

Жданова Л. Ф. – доработка текста.

Пчелкин И. О. – развитие методологии.

Contribution of the authors:

Savenko E. S. – scientific guidance; writing an article.

Matvienko S. A. – the concept of research.

Popov D. V. – final conclusions.

Zhdanova L. P. – revision of the text.

Pchelkin I. O. – development of methodology.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.03.2025; одобрена после рецензирования 18.04.2025; принята к публикации 25.04.2025.

The article was submitted 27.03.2025; approved after reviewing 18.04.2025; accepted for publication 25.04.2025.