

## К ВОПРОСУ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ В СОПРЯЖЕНИИ «ГИЛЬЗА ЦИЛИНДРОВ-ПОРШНЕВОЕ КОЛЬЦО» ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

**Салахутдинов Ильмас Рифкатович**<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования»

**Глущенко Андрей Анатольевич**<sup>2</sup>, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и сервис автомобилей им. И.С. Антонова»

**Хохлов Алексей Леонидович**<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования»

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ,

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1; тел.: +7-8422 55-95-13, [ilmas.73@mail.ru](mailto:ilmas.73@mail.ru)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Ульяновский ГУ,

432017, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42; тел.: +7-8422 42-61-47, [oieldel@yandex.ru](mailto:oieldel@yandex.ru)

**Ключевые слова:** разность потенциалов, цилиндропоршневая группа, энергетические уровни, работа выхода электронов, дислокации.

Работа посвящена исследованию процесса возникновения разности потенциалов в контакте деталей цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания, при рассмотрении его как электрохимической системы «поршневое кольцо – моторное масло – гильза цилиндров». С использованием классической теории электропроводности возникновение разности потенциалов в сопряжении рассмотрено с точки зрения неодинаковой работы электронов, совершаемой при выходе из металлов, различной концентрации в контактирующих металлах не связанных электронов и величины энергетических уровней Ферми. При работе двигателя внутреннего сгорания (ДВС), когда происходит перемещение трущихся поверхностей деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) относительно друг друга, была сделана попытка обоснования возникновения разности потенциалов с точки зрения возникновения дислокаций в поверхностных слоях металла в условиях пластической деформации. Согласно предлагаемой теории при смещении атомной решетки на небольшую долю межатомного расстояния, в ней происходит высвобождение электронов, в результате энергетический уровень металла трущейся поверхности возрастает, что и приводит к продолжению процесса перехода электронов с одной трущейся поверхности на другую, и сохранению величины разности потенциалов в ЦПГ в процессе работы ДВС. Измерение разности потенциалов в двигателе УМЗ-417 с помощью разработанного токоъемника и комплекса измерительной аппаратуры при частоте вращения коленчатого вала 1000, 1200 и 1500 мин<sup>-1</sup> показало, что разность потенциалов в сопряжении «гильза цилиндров – поршневое кольцо» изменяется при частоте вращения коленчатого вала 1000 мин<sup>-1</sup> от 121,5 мВ до 111,8 мВ и от 149,2 мВ до 147,3 мВ при частоте 1500 мин<sup>-1</sup>. Полученные результаты подтверждают, что в процессе взаимного перемещения рабочих поверхностей деталей ЦПГ относительно друг друга и сдвига поверхностных слоев в контактирующих металлах происходит изменение разности энергетических уровней и возникновение разности потенциалов в контакте.

### Введение

Рассматривая двигатель внутреннего сгорания (ДВС) как систему механизмов и узлов, отдельные элементы которых контактируют в условиях широкого диапазона нагрузок, скоростей и температур, необходимо учитывать, что при контакте этих элементов энергия динамических процессов превращается в энергию колебательных и волновых перемещений частиц поверхностного слоя металла в месте контакта. Данный процесс сопровождается возникновением различного рода термических, термоэлектронных, термохимических и др. явлений. Возникновение таких явлений вызывает изменение свойств материала контактирующих поверхностей, в результате которых происходит снижение ресурса работы деталей и узлов.

Наименее изученным остается процесс возникновения термоэлектронных процессов. Данный процесс характеризуется возникновением разности потенциалов в узлах трения деталей ДВС, вызывающей повышенный износ деталей, поэтому исследование причин ее появления позволит разработать методы снижения разности потенциалов и повысить ресурс работы ДВС.

Материалы и методика исследований

При исследовании процесса возникновения разности потенциалов в сопряжении «гильза цилиндров – поршневое кольцо» при работе ДВС воспользуемся представлениями классической теории электропроводности. В соответствии с этой теорией возникновение контактной

разности потенциалов возможно по двум причинам: в силу разности работ по выходу электронов из поверхностей металлов и различной концентрации в контактирующих металлах свободных электронов.

Согласно теории «свободных электронов» металлы гильзы цилиндров (I) и поршневого кольца (II) отличаются разностью работ по выходу электронов из поверхностей в месте их контакта. Это объясняется разными энергетическими уровнями Ферми ( $E_F$ ) в них [1 - 4, 12 - 14].

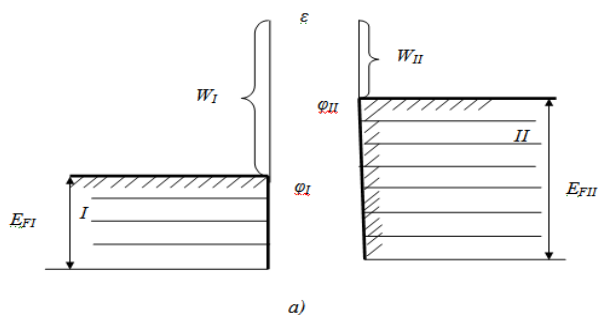


Рис. 1 – Схема возникновения разности потенциалов

Согласно известным данным энергетический уровень Ферми поршневого кольца ( $E_{FII}$ ) (большее процентное содержание железа) больше и располагается выше, чем у гильзы цилиндров ( $E_{FI}$ ). Соответственно, работа выхода с поверхности поршневых колец электронов ( $W_{II}$ ) меньше, чем аналогичная работа по выходу из гильзы цилиндров ( $W_I$ ) при их контакте. Поэтому электроны с поршневого кольца будут переходить на низкий уровень гильзы цилиндров, заряжая ее отрицательным зарядом. То есть в контакте возникнет разность потенциалов (рис. 1) [1 - 4, 12 - 14]:

$$\varphi = W_I - W_{II}, \quad (1)$$

Поскольку контактная разность потенциалов, по классической теории электропроводности, обусловлена различным содержанием в металлах свободных электронов [5 - 11], то к распределению электронов в контактирующих материалах может быть применено классическое распределение Больцмана [2, 5, 6]:

$$\frac{n_1}{n_2} = \exp\left(-\frac{W_I - W_{II}}{kT}\right) = \exp\left(-\frac{e(\varphi_1 - \varphi_2)}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – соответственно, количество электронов в металлах гильзы цилиндров и поршневого кольца, ед.;  $W_I = e\varphi_1$  и  $W_{II} = e\varphi_2$  – потенциальная энергия электрона соответственно;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – соответственно внешняя и внутренняя

разность потенциалов, эВ;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана, Дж/К,  $T$  – температура проводника, К.

Логарифмирование выражения (2) дает следующее:

$$\ln \frac{n_1}{n_2} = -\frac{e(\varphi_1 - \varphi_2)}{kT}. \quad (3)$$

Откуда

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}. \quad (4)$$

Тогда можно записать, что контактная разность потенциалов:

$$\Delta\varphi_{12} = -\frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}. \quad (5)$$

Предположив, что количество свободных электронов равно количеству атомов, то выражение (5) примет вид:

$$\Delta\varphi_{12}'' = \frac{kT}{e} \ln \frac{d_2 \frac{N_A^2}{A_2}}{d_1 \frac{N_A^1}{A_1}}, \quad (6)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – соответственно плотность материалов гильзы цилиндров и поршневого кольца, г/м<sup>3</sup>;  $N_A^1$  и  $N_A^2$  – число Авогадро ( $6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>);  $A_1$  и  $A_2$  – атомная масса, г/моль.

В этом случае контактная разность потенциалов будет описываться выражением:

$$\Delta\varphi_{12} = \Delta\varphi_{12}' + \Delta\varphi_{12}'' = -\frac{W_I - W_{II}}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{d_2 \frac{N_A^2}{A_2}}{d_1 \frac{N_A^1}{A_1}}. \quad (7)$$

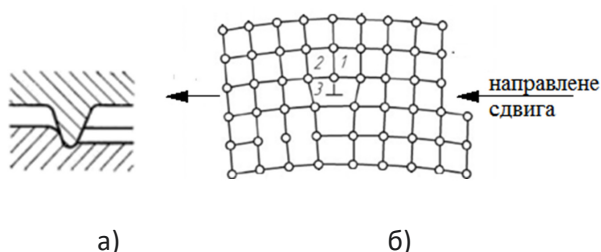
Данное выражение справедливо для непосредственного контакта двух металлов. В реальном ДВС в сопряжениях деталей ЦПГ присутствует слой смазочного масла, в результате сопряжение «гильза цилиндров – поршневое кольцо» представляет собой систему, состоящую из трех элементов (металл – электролит – металл). В этом случае контакт будет представлять собой закрытую электрохимическую систему. Тогда к ней можно применять основные законы электрохимии [10]. То есть сопряжение ЦПГ «поршневое кольцо – моторное масло – гильза цилиндров» будет представлять собой гальваническую пару. Исходя из этого, оправ-

данным будет при расчете величины потенциала учитывать значение химического потенциала материалов сопряжения, тогда выражение (7) примет вид:

$$\Delta\varphi_{12} = (\mu_B - \mu_A) + \frac{kT}{e} \ln \frac{d_2 \frac{N_A^2}{A_2}}{d_1 \frac{N_A^1}{A_1}} \quad (8)$$

где  $\mu_B$  и  $\mu_A$  – химический потенциал материала поверхностей В и А,

Полученная формула (8) позволяет определить величину контактной разности потенциалов до момента выравнивания энергетических уровней сопрягаемых металлов, то есть при неподвижном контакте. В процессе работы ДВС происходит постоянное перемещение одной поверхности контактирующего металла относительно другой, в результате которого происходит их износ по причине сдвига поверхностного слоя одного металла при внедрении в него микронеровностей металла другого контактирующего слоя. В этом случае, для обоснования возникновения разности потенциалов воспользуемся теорией дислокаций (линейное несовершенство, образующее внутри кристалла металла границу зоны сдвига поверхностных слоев трущихся металлов) [5 - 11]. В соответствии с данной теорией при внедрении микронеровностей одной трущейся поверхности в другую (явление износа) происходит сдвиг кристаллической решетки металла, в который внедряются микронеровности другого металла, это вызывает возникновение дислокации. Данный процесс характеризуется тем, что при смещении атомной решетки (1) и (2) влево на небольшую долю межатомного расстояния, в атомной решетке (3) происходит высвобождение электронов (рис. 2).



**Рис. 2 – Возникновение свободных электронов при сдвиге атомной решетки материала трущейся поверхности: а – схема фрикционного контакта; б – возникновение вакансий в кристаллической решетке**

В результате энергетический уровень ме-

таллов трущихся поверхностей возрастает, это подтверждается уравнением изменения энергии в поверхностном слое контактирующего металла [17 - 20]:

$$\Delta E = n \cdot E - T \cdot \Delta S = n \cdot E - k \cdot T [N \cdot \ln N - (N - n) \cdot \ln(N - n) - n \cdot \ln n] \quad (9)$$

где  $n$  – количество вакансий, возникающих в дислокации при сдвиге, ед.;  $E$  – энергия затрачиваемая на образование дислокаций, эВ;  $T$  – температура металла, °К;  $\Delta S$  – энтропия, эВ/К;  $N$  – количество атомов в месте сдвига, ед.

С учетом приращения энергии выражение (8) примет вид:

$$\Delta\varphi_{12} = (\mu_B - \mu_A) + \frac{n}{N - n} \ln \frac{d_2 \frac{N_A^2}{A_2}}{d_1 \frac{N_A^1}{A_1}} \quad (10)$$

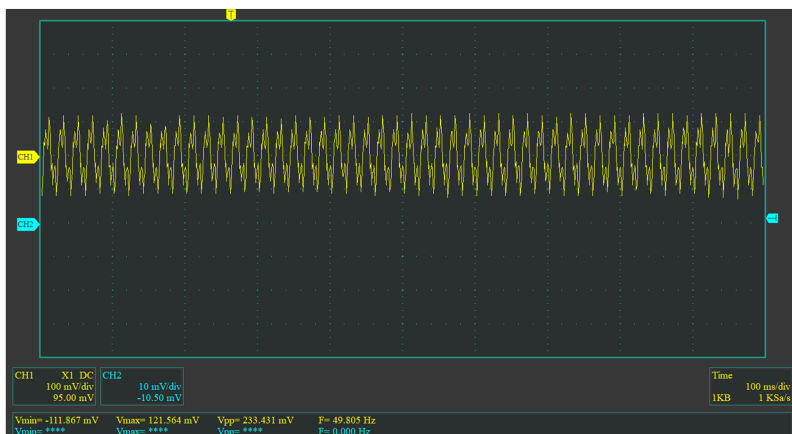
Что и приводит к продолжению процесса перехода электронов с одной трущейся поверхности на другую, и изменению величины разности потенциалов в сопряжении «гильза цилиндров – поршневое кольцо» в процессе работы ДВС.

Анализ выражения (10) показывает, что при неизменных величинах значений основных показателей, изменение приращения энергии, а соответственно и потенциала от скорости относительного перемещения трущихся поверхностей, будет определяться только величиной приращения количества вакансий ( $n$ ). Сделав предположение, что с образованием одной дислокации образуется одна вакансия, тогда зависимость образования вакансий от скорости взаимного перемещения, применительно к ЦПГ, получим:

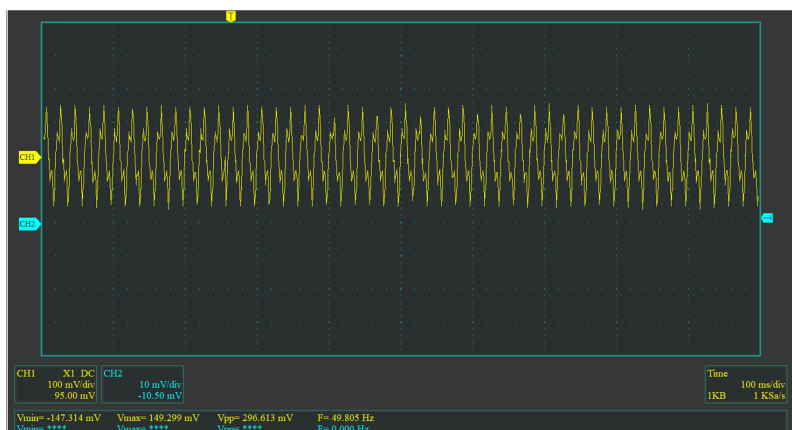
$$n = \rho = \frac{S \cdot w}{30} \cdot t \cdot \frac{S}{V}, \quad (11)$$

где  $\rho$  – плотность дислокаций, дисл./м<sup>3</sup>;  $S$  – ход поршня, м;  $w$  – частота вращения коленчатого вала ДВС, мин<sup>-1</sup>;  $t$  – время работы с заданной частотой вращения коленчатого вала ДВС, мин;  $V$  – объем деформируемого поверхностного слоя металла, м<sup>3</sup>.

Тогда изменение разности потенциалов от скорости взаимного перемещения трущихся поверхностей деталей ЦПГ:



**Рис. 3 – Осциллограмма изменения величины разности потенциалов в сопряжении ЦПГ «поршневое кольцо - гильза цилиндров» при частоте вращения коленчатого вала ДВС 1000 мин<sup>-1</sup>**



**Рис. 4 – Осциллограмма изменения величины разности потенциалов в сопряжении ЦПГ «поршневое кольцо - гильза цилиндров» при частоте вращения коленчатого вала ДВС 1500 мин<sup>-1</sup>**

$$\Delta\varphi_{12} = (\mu_B - \mu_A) + \frac{S \cdot n}{30} \cdot t \cdot \frac{S}{V} \ln \frac{d_2 \frac{N_A^2}{A_2}}{d_1 \frac{N_A^1}{A_1}} \quad (12)$$

Как видно, с увеличением скорости вращения коленчатого вала ДВС увеличивается скорость поршня, в результате будет увеличиваться разность потенциалов в сопряжении.

#### Результаты исследования

Для подтверждения теоретических выкладок проводилось измерение разности потенциалов в двигателе УМЗ-417 с помощью разработанного токосъемника и комплекса измерительной аппаратуры при частоте вращения коленчатого вала 1000, 1200 и 1500 мин<sup>-1</sup>. В результате исследований было установлено, что разность потенциалов в сопряжении ЦПГ «поршневое кольцо - гильза цилиндров»

изменяется при частоте вращения коленчатого вала 1000 мин<sup>-1</sup> от 121,5 мВ до – 111,8 мВ (рис. 3), до величины от 149,2 мВ до – 147,3 мВ при частоте 1500 мин<sup>-1</sup> (рис. 4).

При этом нулевые значения разности потенциалов соответствуют моменту прохождения поршнем верхних и нижних мертвых точек (рис. 3, 4).

На основании полученных экспериментальных данных сделана попытка установления полиномиальной зависимости изменения величины разности потенциалов в сопряжении ЦПГ «поршневое кольцо - гильза цилиндров» от частоты вращения коленчатого вала ДВС (рис. 5). Полученные данные показывают, что с увеличением частоты вращения коленчатого вала увеличение разности потенциалов происходит с величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 1,00$ .

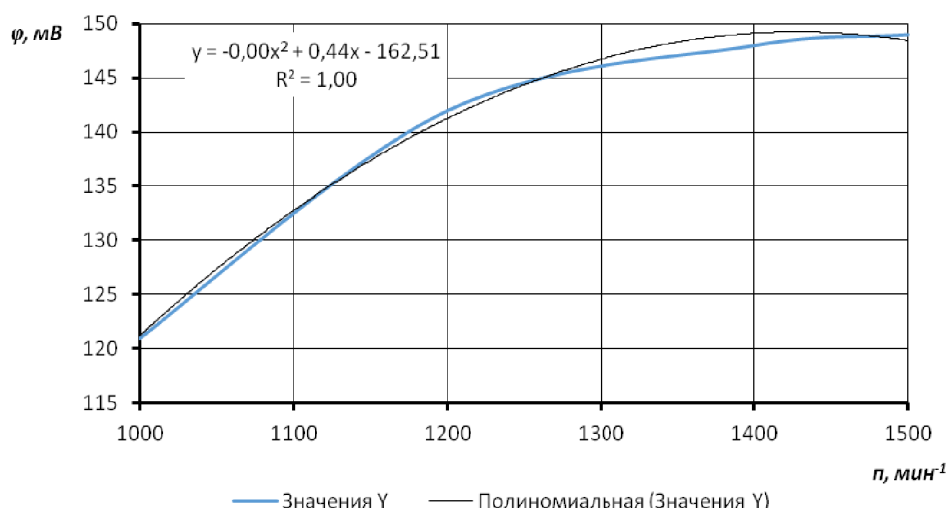
#### Обсуждение

Известные теории возникновения разности потенциалов между движущимися металлическими поверхностями основаны на ряде Вольты и ограничиваются только различной работой выхода электронов из металлов и их концентрации в проводниках. Это затрудняет не только описание процесса возникновения разности потенциалов, но и не дает четкого объяснения причин сохранения определенной ее величины при работе ДВС, а, соответственно, и разработки методов ее снижения.

Предлагаемая теория на основе появления дислокаций по причине сдвига поверхностных слоев трущихся металлов может быть использована для определения величины возникающей разности потенциалов при работе ЦПГ. Использование данной теории позволит также установить влияние разности потенциалов на процесс износа и ресурса деталей ЦПГ, что может быть использовано для диагностирования по величине разности потенциала технического состояния не только ЦПГ, но и других узлов трения ДВС.

#### Заключение

Полученные результаты подтверждают, что разность потенциалов при работе ЦПГ возникает в результате разности работы выхода электронов с энергетических уровней трущихся металлов при статическом контакте, а в процес-



**Рис. 5 – Зависимость изменения величины разности потенциалов в сопряжении ЦПГ «поршневое кольцо - гильза цилиндров» от частоты вращения коленчатого вала ДВС**

се взаимного перемещения рабочих поверхностей друг относительно друга по причине сдвига поверхностных слоев трущихся металлов, что приводит к поддержанию разности энергетических уровней и возникновению разности потенциалов в контакте.

#### Библиографический список

1. Дзюб, А. Г. Исследование скорости коррозии при трении / А. Г. Дзюб, В. А. Кузнецов, Г. А. Преис // Проблемы трения и изнашивания : сборник. – Киев : Пищевая промышленность, 1980. - Вып. 17. - С. 1-18.
2. Лихтман, В. И. Физико-химическая механика материалов / В. И. Лихтман, Е. Д. Щукин, П. А. Ребиндер. – Москва : Издательство АН СССР, 1962. - 186 с.
3. Карпенко, Г. В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов / Г. В. Карпенко. – Киев: Наукова думка, 1976. - 126 с.
4. Уханов, Д. А. Наведённая ЭДС – критерильный показатель минимальной частоты вращения коленчатого вала поршневого ДВС / Д. А. Уханов, А. П. Уханов, В. А. Перов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2018. - № 1(41). - С. 21-25.
5. Джонстон, В. Скорость передвижения, плотность дислокаций и пластическая деформация кристаллов фтористого лития / В. Джонстон, Дж. Гилман // Успехи физической науки. – Москва: Наука, 1960. – С. 489-515.
6. Глазков, В. Н. Свойства электронного Ферми-газа / В. Н. Глазков. – Москва : МФТИ, 2016. – 34 с.
7. Постников, С. И. Электрические явления при трении и резании / С. И. Постников. – Волго-Вятское кн. изд-во, 1975. – 280 с.
8. Преис, Г. А. Электрохимические явления при трении металлов / Г. А. Преис, А. Г. Дзюб // Трение и износ. – 1980. - Т.1, № 2. – С. 217-235.
9. Рыжкин, А. А. Об электрических явлениях при трении / А. А. Рыжкин, В. Э. Бурлаков // Вестник ДГТУ. – 2011. - Т.11, № 9. – С. 1564-1573.
10. Рыжкин, А. А. Об электрических явлениях при трении / А. А. Рыжкин, В. Э. Бурлаков // Вестник ДГТУ. - 2011. - Т.11, № 9. - С. 1564–1573.
11. Иванова, Е. И. Исследование температурной зависимости контактной разности потенциалов в металлах / Е. И. Иванова, В. С. Мишаков, И. А. Обухова. – Москва: Энергия, 2018. - 46 с.
12. Электрохимические явления в сопряжениях ДВС / И. Р. Салахутдинов, А. А. Глущенко, А. П. Никифоров, А. В. Лисин // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения : материалы IX Международной научно-практической конференции. – Ульяновск : УлГАУ, 2018. – С. 257-261.
13. Салахутдинов, И. Р. К процессу образованию контактной разности потенциалов в сопряжениях ДВС / И. Р. Салахутдинов, А. А. Глущенко // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения: материалы Национальной научно-практической конференции. – Димитровград, 2018. – С. 273-277.
14. Салахутдинов, И. Р. Электрохимические явления в ДВС / И. Р. Салахутдинов, А. А. Глущенко // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения: материалы Национальной научно-практической конференции. – Димитровград, 2018. – С. 277-282.
15. Подмастерьев, К. В. Состояние и инструментальное обеспечение электрических методов мониторинга узлов трения / К. В. Подмастерьев // Известия ТулГУ: Технические науки. - 2012. - № 7. - С. 221–234.
16. Рыбников, Ю. С. Основы электронной теории износа при трении / Ю. С. Рыбников, Л. В. Круглова // Вестник машиностроения. Машинострое-

ние. -1989. - С. 5-10.

17. Иванова, Е. И. Исследование температурной зависимости контактной разности потенциалов в металлах / Е. И. Иванова, В. С. Мишаков, И. А. Обухова. – Москва: Энергия, 2018. - 46 с.

18. Texture Development and Simulation in Copper during Route B—Equal Channel Angular Pressing / I. Kopacz, M. Zehetbauer, L.S. Toth, I.V. Alexandrov, B. Ortner // Symposium on Mechanical Science: Proc. of the 22nd International Symposium, Roskilde. - 2001. - P.295- 300.

19. Zhilyaev, A. P. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications / A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon // Progress in Materials Science. - 2008. - Vol. 53. - P. 893-979.

20. The role of hydrostatic pressure in Severe Plastic Deformation / M. Zehetbauer, H. P. Stilwe, A. Vorhauer, E. Schafler, J. Kohout // Nanomaterials by Severe Plastic Deformation: Fundamentals - Processing - Applications. Proc. 2nd International Conference. Vienna: J.Wiley VCH Weinheim. - 2004. - P. 435-446.

## TO THE ISSUE OF EMERGENCE OF A POTENTIAL DIFFERENCE IN “CYLINDER LINER-PISTON RING” JOINT OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Salakhutdinov I. R.<sup>1</sup>, Glushchenko A. A.<sup>2</sup>, Khokhlov A. L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University

432017, Ulyanovsk, Novyi Venets boulevard, 1; tel.: +7-8422 55-95-13, [ilmas.73@mail.ru](mailto:ilmas.73@mail.ru)

<sup>2</sup>FSBEI HE Ulyanovsk State University

432017, Ulyanovsk, Leo Tolstoy st., 42; tel.: +7-8422 42-61-47, [oidel@yandex.ru](mailto:oidel@yandex.ru)

**Keywords:** potential difference, cylinder-piston group, energy levels, electron work function, dislocations.

The work is devoted to the study of the process of emergence of a potential difference in the contact of parts of the cylinder-piston group of an internal combustion engine, when considering it as an electrochemical system “piston ring - engine oil - cylinder liner”. Using the classical theory of electrical conductivity, the emergence of a potential difference in the joint is considered from the point of view of unequal work of electrons performed when leaving metals, different concentrations of unbound electrons in contacting metals, and the values of Fermi energy levels. During operation of an internal combustion engine (ICE), when the rubbing surfaces of parts of the cylinder-piston group (CPG) move in relation to each other, an attempt was made to justify the emergence of a potential difference from the point of view of dislocations in the surface layers of the metal under conditions of plastic deformation. According to the proposed theory, when the atomic lattice is displaced by a small proportion of the interatomic distance, electrons are released in it, as a result, the energy level of the metal of the rubbing surface increases, which leads to further process of transfer of electrons from one rubbing surface to another, and maintaining the value of the potential difference in the CPG during ICE operation. Measurement of the potential difference in UMZ-417 engine using the developed current collector and a set of measuring equipment at a crankshaft speed of 1000, 1200 and 1500 min<sup>-1</sup> showed that the potential difference in the cylinder liner-piston ring joint changes at a crankshaft speed of 1000 min<sup>-1</sup> from 121.5 mV to 111.8 mV and from 149.2 mV to 147.3 mV at a revolution of 1500 min<sup>-1</sup>. The results obtained confirm that in the process of mutual movement of the working surfaces of the CPG parts in relation to each other and the shift of the surface layers in the contacting metals, the difference in energy levels changes and the potential difference occurs in the contact.

**Bibliography:**

1. Dzyub, A. G. Study of the corrosion rate during friction / A. G. Dzyub, V. A. Kuznetsov, G. A. Preis // Problems of friction and wear: collection. - Kiev: Food industry, 1980. - Issue. 17. - P. 1-18.
2. Likhtman, V. I. Physical and chemical mechanics of materials / V. I. Likhtman, E. D. Shchukin, P. A. Rebinder. - Moscow: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1962. - 186 p.
3. Karpenko, G. V. Influence of the environment on the strength and durability of metals / G. V. Karpenko. - Kiev: Naukova Dumka, 1976. - 126 p.
4. Ukhanov, D. A. Induced EMF - a criterion indicator of minimum rotational speed of the crankshaft of a piston internal combustion engine // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. - 2018. - № 1(41). - P. 21-25.
5. Johnston, V. Velocity of movement, dislocation density and plastic deformation of lithium fluoride crystals / V. Johnston, J. Gilman // Achievements of physical science. - Moscow: Nauka, 1960. - P. 489-515.
6. Glazkov, V. N. Properties of electronic Fermi gas / V. N. Glazkov. - Moscow: MFFTI, 2016. - 34 p.
7. Postnikov, S. I. Electric phenomena during friction and cutting / S. I. Postnikov. - Volga-Vyatka publishing house, 1975. - 280 p.
8. Preis, G. A. Electrochemical phenomena in friction of metals / G. A. Preis, A. G. Dzyub // Friction and wear. - 1980. - V.1, № 2. - P. 217-235.
9. Ryzhkin, A. A. On electrical phenomena during friction / A. A. Ryzhkin, V. E. Burlakov // Vestnik of DSTU. - 2011. - V.11, № 9. - P. 1564-1573.
10. Ryzhkin, A. A. On electrical phenomena during friction / A. A. Ryzhkin, V. E. Burlakov // Vestnik of DSTU. - 2011. - V.11, № 9. - P. 1564-1573.
11. Ivanova E. I. Research on temperature dependence of the contact potential difference in metals / E. I. Ivanova, V. S. Mishakov, I. A. Obukhova. - Moscow: Energy, 2018. - 46 p.
12. Electrochemical phenomena in ICE interfaces / I. R. Salakhutdinov, A. A. Glushchenko, A. P. Nikiforov, A. V. Lisin // Agrarian science and education at the present stage of development: experience, problems and solutions: materials of the IX International Scientific and Practical Conference. - Ulyanovsk: UISAU, 2018. - P. 257-261.
13. Salakhutdinov, I. R. To the process of formation of a contact potential difference in ICE interfaces / I. R. Salakhutdinov, A. A. Glushchenko // Science in modern conditions: from idea to implementation: materials of the National Scientific and Practical Conference. - Dimitrovgrad, 2018. - P. 273-277.
14. Salakhutdinov, I. R. Electrochemical phenomena in internal combustion engines / I. R. Salakhutdinov, A. A. Glushchenko // Science in modern conditions: from idea to implementation: materials of the National Scientific and Practical Conference. - Dimitrovgrad, 2018. - P. 277-282.
15. Podmasteriev, K.V. Status and instrumentation provision of electrical methods for monitoring friction units / K.V. Podmasteriev // Izvestiya of TuSU: Technical sciences. - 2012. - № 7. - P. 221-234.
16. Rybnikov, Yu. S. Fundamentals of electronic theory of wear during friction / Yu. S. Rybnikov, L. V. Kruglova // Vestnik of machinery production. Engineering. -1989. - P. 5-10.
17. Ivanova, E. I. Investigation of temperature dependence of the contact potential difference in metals / E. I. Ivanova, V. S. Mishakov, I. A. Obukhova. - Moscow: Energy, 2018. - 46 p.
18. Kopacz I., Zehetbauer M., Toth L. S., Alexandrov I. V., Ortner B. // Symposium on Mechanical Science: Proc. of the 22nd International Symposium, Roskilde. - 2000. - P. 295-300.
19. Zhilyaev, A. P. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications / A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon // Progress in Materials Science. - 2008. - Vol. 53.-P. 893-979.
20. The role of hydrostatic pressure in Severe Plastic Deformation / M. Zehetbauer, H. P. Stilwe, A. Vorhauer, E. Schafler, J. Kohout // Nanomaterials by Severe Plastic Deformation: Fundamentals - Processing - Applications. Proc. 2nd International Conference. Vienna: J.Wiley VCH Weinheim. - 2004. - P. 435-446.