

**Машиностроение и машиноведение**

УДК 539.3

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-5-4-10

А.Ю. Родичев, А.В. Горин, М.А. Токмакова, А.А. Киричек

**ВЛИЯНИЕ СИЛ ИНЕРЦИИ НА СЦЕПЛЕНИЕ ПОКРЫТИЯ  
С ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ  
ПРИ НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ**

Представлены результаты исследования влияния сил инерции на сцепление покрытия с внешней поверхностью тел вращения при термическом напылении. Предложен математический аппарат для расчета сил инерции, действующих на частицу покрытия при нанесении на внешнюю поверхность тел вращения. В результате выявлены зависимости,

позволяющие прогнозировать прочность сцепления покрытия со стальной основой при термическом напылении.

**Ключевые слова:** сила инерции, антифрикционное покрытие, стальное основание, прочность сцепления, газопламенное напыление.

A.Y. Rodichev, A.V. Gorin, M.A. Tokmakova, A.A. Kirichek

**INFLUENCE OF FORCE OF INERTIA ON COATING CLUTCH  
WITH EXTERNAL SURFACE OF ROTATION BODIES  
WHEN COATING**

A paper is dedicated to the investigation of inertia impact upon coating adherence with the outer surface of revolution solids during coating application. The work purpose is a qualitative and qualitative assessment of factors of antifriction coating application affecting the parts of friction units of machines and units. The relevance is substantiated with that the strength increase of coating applied ensures life, reliability and power effectiveness of machines and mechanisms. The work novelty consists in the application of fundamental dependences and laws to actual manufacturing operations. Adhesion is a basic parameter characterizing quality of the coating applied. Adhesion, in its turn, is characterized with adhesion strength and porosity of the coating applied. The material presented shows the impact of inertia acting upon particles of the coating applied at their falling on the outer surface of rotation. There are defined theoretical dependences describing the process mentioned. The analysis of these dependences shows that inertia can carry out both the positive and negative action during the application of

antifriction coatings. To confirm the theoretical results obtained there were carried out experimental investigations. In the experiment took part some sets of samples upon which PRNH17SR4 antifriction coating was applied. Coating application was carried out with the aid of the Iskra-1 burner with the further fusing. For the qualitative and quantitative strength assessment of adhesion of the coating applied there was used a method for a shear test. The samples prepared were pressed through a matrix on the GMS-50 universal rupture-test machine. As a result of tests carried out there are obtained dependences characterizing adhesion of antifriction coating applied. The dependences obtained show efficient factors impacting the adhesion strength of coatings. By the results of theoretical and experimental investigations there are formulated qualitative and quantitative assessments of factors influencing the process of antifriction coating application on parts.

**Key words:** inertia, antifriction coating, steel base, adhesion strength, flame spraying.

**Введение**

Технологии нанесения покрытий нашли достаточно широкое использование в промышленности, особенно в высокотехнологичных отраслях. Нанесение покрытий применяется в тех случаях, когда необходимо улучшить эксплуатационные характеристики рабочих поверхностей де-

талей машин и механизмов [1,2]. Сейчас антифрикционные покрытия на основе медных сплавов получили широкое распространение [3]. Это объясняется высокими эксплуатационными свойствами и хорошей технологичностью [4]. Однако, низкая прочность адгезионной связи явля-

ется главным недостатком наносимых газотермических покрытий [5]. Это связано с тем, что подготовка поверхности (нарезание «рваной» резьбы, струйно-абразивная обработка, нанесение подслоя, комбинированные способы создания микрорельефа) является основной операцией, которая используется в технологии при нанесении покрытий [6]. В этот период напыляемая поверхность химически активизируется за

### Постановка задачи исследования

В технике адгезия определяется возникновением связей между поверхностными слоями двух разнородных тел, приведенных в соприкосновение. Необходимо разделять адгезию покрытий и частиц [8]. Согласно приведенной классификации, при термических методах напыления возникает взаимодействие частиц и покрытий, носящее адгезионный характер. Повышение прочности сцепления наносимых покрытий с поверхностью основного материала достигается применением предварительных операций, формирующих требуемые характеристики поверхности. Это позволяет сохранить начальную структуру и свойства наносимого покрытия [9].

Технологическими параметрами, оказывающими влияние на качество адгезии наносимого покрытия и основной поверхностью, выступают фракция покрытия, угол напыления, рабочее расстояние между соплом распылителя и изделием. При напылении внешних поверхностей тел

### Теоретическая часть

При формировании покрытия на внешней поверхности тела вращения (рис. 1), расплавленное вещество покрытия поступает из сопла под углом  $\alpha$  к горизонтальной плоскости и со скоростью  $V_u$  падает на подложку детали.

Элементарная центробежная сила инерции, действующая на массу частиц порошка (рис. 1), сталкивающихся с площадью покрытия, равна:

$$d\bar{F}_u^u = -\bar{a}_u dm, \quad (1)$$

где  $dm$  – элементарная масса частицы;

$a_u$  – центростремительное ускорение.

счет выхода из состояния термодинамического равновесия со средой. В тоже время, из-за окисления и адсорбции газов, интенсивно уменьшается активность ранее подготовленной поверхности. Это ведет к тому, что происходит сокращение времени между подготовительными операциями обрабатываемой поверхности и процессом нанесения покрытий [7].

вращения очень часто не акцентируется внимание на расположение в плоскости относительно оси вращения рабочей горелки. Для улучшения прочности сцепления покрытия на труднодоступных и геометрически сложных поверхностях нужно принимать в расчет как можно больше факторов. В данной ситуации такими факторами выступают силы инерции, появляющиеся при нанесении частиц покрытия на вращающееся изделие. На частицу наносимого покрытия, попавшую на вращающуюся поверхность, действуют силы инерции и силы инерции Кориолиса. В зависимости от направления этих сил инерции могут возникать различные эффекты. Для выведения на новый качественный уровень процесса термического напыления необходимо более детальное изучение инерционных сил частиц, возникающих во время нанесения их на внешние поверхности тел вращения.

При помощи расхода материала за единицу времени выразим элементарную массу в выражении (1) и проинтегрируем. В результате получим центробежную силу инерции, действующую на напыляемый материал:

$$F_u^u = 0,5 \left( \frac{\pi n}{30} \right)^2 D \int_0^r q dt = \frac{(\pi \cdot n)^2 D}{1800} \int_0^r q dt, \quad (2)$$

где  $q$  – функция расхода напыляемого материала.

При обработке внешней поверхности цилиндрической детали центробежная сила инерции всегда направлена вдоль радиуса от центра вращения и стремится отбросить напыляемые частицы с поверхно-

сти детали (рис. 1). Центробежная сила инерции прямо пропорционально зависит от диаметра обрабатываемой детали.

Для получения более качественного эффекта угол напыления варьируется в некотором диапазоне [10]. Однако, исследования, проведенные авторами, указывают на то, что увеличение плотности покрытия

зависит конкретного угла наклона распылителя. В момент попадания частиц покрытия на поверхность вращения возникает Кориолисова сила инерции:

$$d\bar{F}_k^u = -\bar{a}_k dm, \quad (3)$$

где  $a_k$  – ускорение Кориолиса.

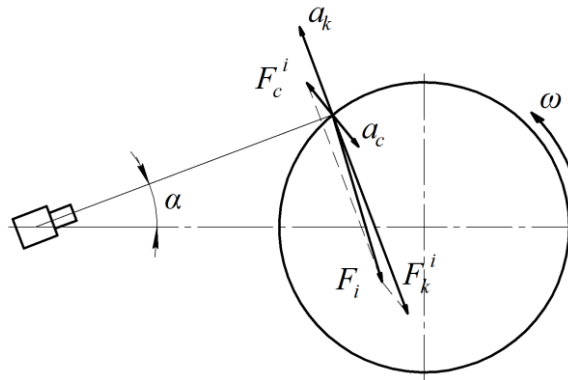


Рис. 1. Схема действия сил инерции при нанесении покрытия на внешнюю поверхность тела вращения

Модуль вектора ускорения Кориолиса равен:

$$a_k = 2\omega \cdot V_q \sin(\angle \vec{V}_q \vec{\omega}), \quad (4)$$

где  $V_q$  – скорость полета частицы напыления.

Вектор ускорения Кориолиса должен быть одновременно перпендикулярен двум векторам – вектору относительной скорости частицы и вектору угловой скорости.

Стоит учитывать, что вектора  $\vec{a}_k$ ,  $\vec{\omega}$ ,  $\vec{V}_q$  должны образовывать правую тройку векторов. В данном случае угол между вектором угловой скорости детали  $\vec{\omega}$  и вектором линейной скорости частицы  $\vec{V}_q$  распыляемого материала равен  $90^\circ$ , так как вектор скорости частицы лежит в плоскости перпендикулярной оси вращения детали.

Кориолисова сила инерции равна:

$$F_k^u = \left(\frac{\pi n}{15} \cdot V_q \cdot \sin(\angle \vec{V}_q \vec{\omega})\right) \int_0^\tau q dt. \quad (5)$$

Кориолисова сила инерции в сотни раз превышает центробежную силу инерции и не зависит от диаметра обрабатываемой детали. Поэтому необходимо учитывать ее действие при напылении.

Вектор силы инерции, действующей на частицу, равен сумме векторов центробежной силы инерции и силы инерции Кориолиса. Так, если распылитель расположен повернутым против часовой стрелки относительно горизонтали (рис. 1), то результирующий вектор силы инерции  $F_u$  стремится внедрить частицы во внутрь поверхности. Тем самым улучшая качество наносимого покрытия. В другом случае, если повернуть распылитель на угол  $\alpha$  по часовой стрелке, относительно горизонтальной оси (рис. 2), то Кориолисова сила будет направлена под углом  $90^\circ$  относительно скорости частицы от обрабатываемой поверхности. Результирующий вектор силы инерции  $F_u$  будет стремиться отбросить частицы напыляемого материала. Это ухудшает качество поверхности.

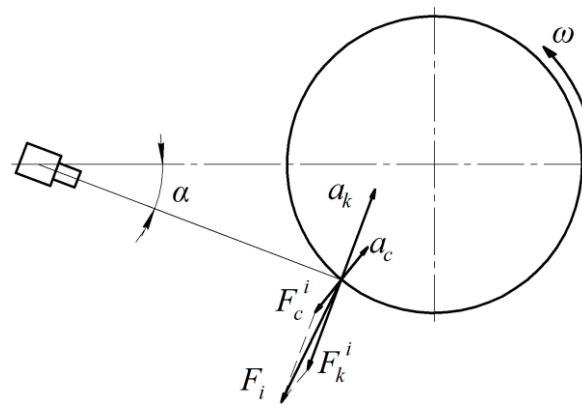


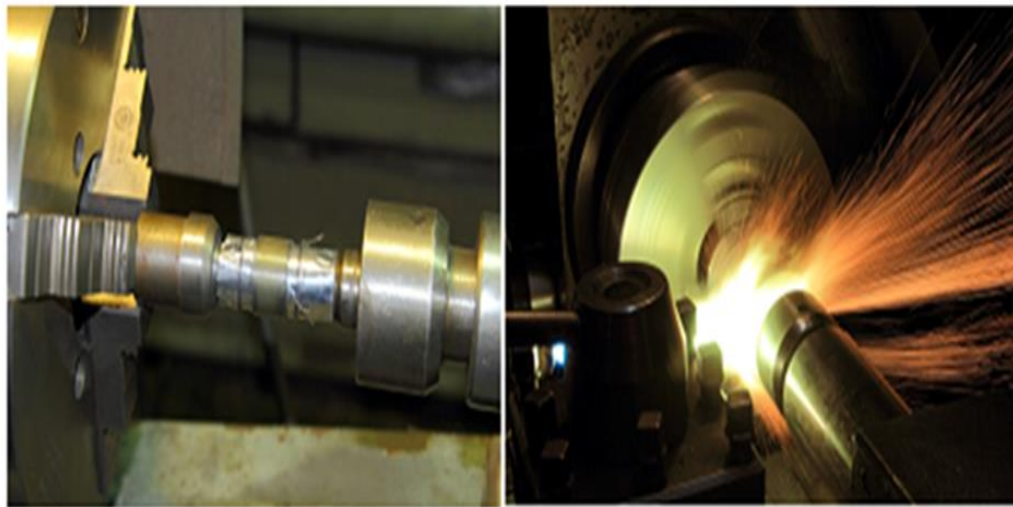
Рис. 2. Схема действия сил инерции при изменении направления нанесения покрытия на внешнюю поверхность тела вращения

### Экспериментальная часть

В ходе экспериментальных исследований подтверждалась ранее представленная теория. Для этого было выполнено определенное количество образцов, на которые наносилось покрытие. Материал образцов сталь 20. В роли покрытия выступал порошок ПРНХ17СР4. Нанесение порошка (рис. 3) проводилось с использованием газопламенного напыления. Инстру-

ментом является горелка Искра-1. Последующее оплавление производилось инструментом горелкой Искра-2.

Значение факторов, при которых достигается увеличение адгезии [11], являются: фракции порошка  $d=60\div70$  мкм, угол напыления (атаки)  $\beta=90\pm5$  град, дистанция напыления  $L=120\div140$  мм.



а)

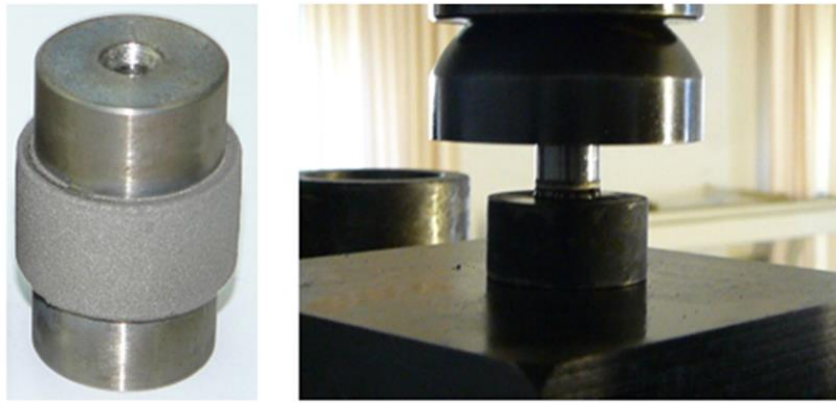
б)

Рис. 3. Процесс нанесения покрытия:

а) подготовка под напыление; б) нанесения покрытия на внешнюю поверхность тела вращения

Применение покрытий, включающих в себя металлические фракции, обосновывается повышенной адгезией. Для подтверждения полученных результатов применялся способ испытания на сдвиг [12]. В данном случае образец с покрытием про-

давливался сквозь матрицу (рис. 4а). Указанные испытания производились на универсальной разрывной машине ГМС-50 по ГОСТ 7855-68. Фото процесса продавливания представлено на рис. 4б.



а)

б)

Рис. 4. Фото элементов процесса определения прочности сцепления: а – образец для испытания; б – продавливание образца через матрицу

В результате обработки экспериментальных данных были получены характерные зави-

симости, представленные на рис. 5 – 7. .

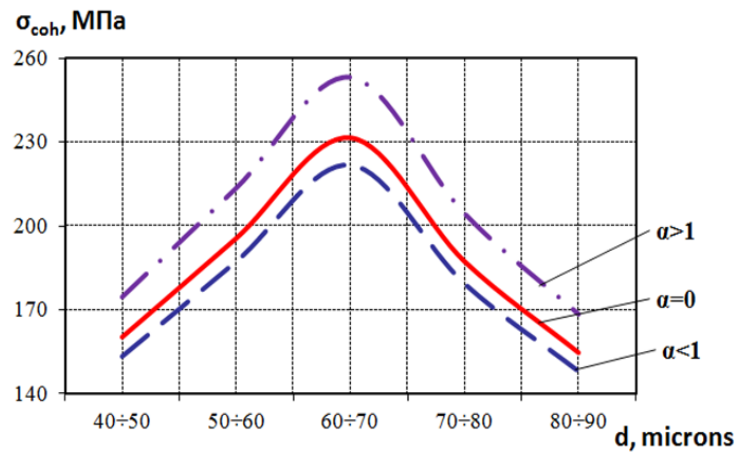


Рис. 5. Зависимость фракции порошка d и прочности сцепления  $\sigma_{coh}$  (угол атаки  $\beta=90$  град.)

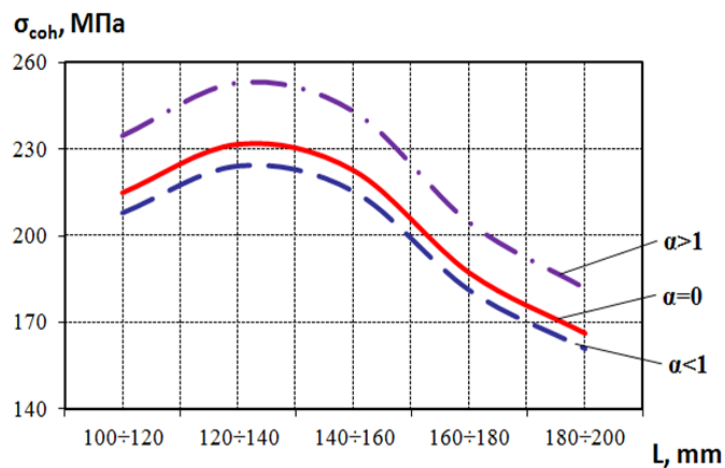


Рис. 6. Зависимость дистанции напыления L и прочности сцепления  $\sigma_{coh}$  (фракция порошка d=60-70 мкм)

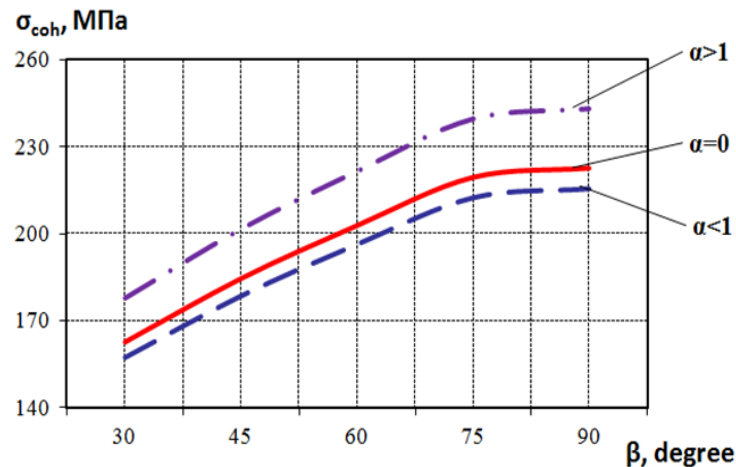


Рис. 7. Зависимость угла атаки  $\beta$  и прочности сцепления  $\sigma_{сщ}$  (фракция порошка  $d=60\div 70$  мкм)

## Выводы

Экспериментально выявленные показатели сцепления покрытия с основанием в зависимости от силы инерции удовлетворяют теоретическим предположениям. На полученных экспериментально зависимостях существуют достаточно ярко выраженные экстремумы, соответствующие рациональным параметрам нанесения покрытий. Следовательно, основываясь на полученных результатах, возможно сделать следующие выводы:

- на прочность сцепления покрытия с внешней поверхностью тел вращения влияют инерционные силы;
- на частицу вещества действует сила инерции Кориолиса существенно больше,

чем центробежная сила инерции в случае абсолютно неупругого столкновения;

- изменение равнодействующей сил инерции зависит от расположения термораспылителя относительно оси изделия;

- направление вращения детали не влияет на качество и прочность сцепления покрытия в том случае, если ось перпендикулярна касательной к окружности в точке падения частицы напыляемого материала;

- для повышения прочности сцепления и уменьшения пористости слоя покрытия, необходимо располагать сопло горелки таким образом, чтобы силы инерции, проталкивали наносимые частицы покрытия в глубь подготовленной поверхности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1987.
2. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. [и др.]. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учеб. для ВУЗов. М.: Металлургия, 1987.
3. Ярошевич В.К., Белорецкий М.А. Антифрикционные покрытия из металлических порошков. Минск: Наука и техника, 1981. 175 с.
4. Курбатова И.А. Технология, структура и свойства антифрикционных материалов на основе системы железо-медь, содержащих графит: дис. ... канд. техн. наук. М., 1986.
5. Кутьков А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия. М.: Машиностроение, 1976. 152 с.
6. Rodichev, A.Y., Sytin, A.V., Barabash, V.V., Technological increase of adhesion strength between anti-friction coating and base in bimetal fluid-film bearings // Solid State Phenomena: International Conference on Industrial Engineering, ICIE-2017. Volume 265 SSP, 2017, Pages 284-289.
7. Hasuy A., Morigaki O. Welding and spraying. М.: Engineering 1985. 240 p. (in Russian)
8. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. М.: Химия, 1977. 345с.
9. Дерягин Б.В., Кротова Н.Л., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1973. 279с.
10. Коробов Ю.С.. Анализ свойств газотермических покрытий : учеб. пособие в 2 ч. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. Ч. 2. 92 с.
11. Barsukov G. Barabash V., Rodichev A., Kozhus. O. Technology of powder coatings application by gas-flame spraying using oxyhydrogen flame // Materials Science Forum, Vol. 906, 2017. pp. 80-87.
12. Suslov, A.G. Technological provision of operation properties and quality of machines 1997 Trenie i Iznos 18(3), pp. 311-320.

1. Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L., Ardatovskaya E.N. *Gas-thermal Powder Coatings*. Reference Book. Kiev: Scientific Thought, 1987.
2. Antsiferov V.N., Bobrov G.V., Druzhinin L.K. [et al.]. *Powder Metallurgy and Sprayed Coatings*: college manual. M.: Metallurgy, 1987.
3. Yaroshevich V.K., Beloretzky M.A. Metal powder antifriction coatings. Minsk: *Science And Engineering*, 1981. pp. 175.
4. Kurbatova I.A. *Technology, Structure and Properties of Antifriction Materials Based on System of Iron-Copper Containing Graphite*: thesis for Can. Sc. Tech. degree. M., 1986.
5. Kutkov A.A. *Wear-resistant and Antifriction Coatings*. M.: Mechanical Engineering, 1976. pp. 152.
6. Rodichev, A.Y., Sytin, A.V., Barabash, V.V., Technological increase of adhesion strength between anti-friction coating and base in bimetal fluid-film bearings // *Solid State Phenomena: International Conference on Industrial Engineering, ICIE-2017*. Volume 265 SSP, 2017, Pages 284-289.
7. Hasuy A., Morigaki O. *Welding and spraying*. M.: Engineering 1985. 240 p. (in Russian)
8. Zimon A.D. *Adhesion of Films and Coatings*. M.: Chemistry, 1977. pp. 345.
9. Deryagin B.V., Krotova N.L., Smilga V.P. *Solid Adhesion*. M.: Science, 1973. pp. 279.
10. Korobov Yu.S. *Gas-thermal Coating Properties Analysis*: manual in 2 Parts Yekaterinburg: Urals University Publishers, 2016. Part 2. pp. 92.
11. Barsukov G. Barabash V., Rodichev A., Kozhus. O. Technology of powder coatings application by gas-flame spraying using oxyhydrogen flame // *Materials Science Forum*, Vol. 906, 2017. pp. 80-87.
12. Suslov, A.G. Technological provision of operation properties and quality of machines 1997 *Trenie i Iznos* 18(3), pp. 311-320.

Ссылка для цитирования:

Родичев А.Ю., Горин А.В., Токмакова М.А., Киричек А.А. Влияние сил инерции на сцепление покрытия с внешней поверхностью тел вращения при нанесении покрытий // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2020. № 5. С. 4-11. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-5-4-10.

Статья поступила в редакцию 25.02.20.

Рецензент: д.т.н., профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета

Мокрицкий Б.Я.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 20.04.20.

#### Сведения об авторах:

**Родичев Алексей Юрьевич**, к.т.н., доцент кафедры «Сервис и ремонт машин» Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, e-mail: rodfox@yandex.ru.

**Горин Андрей Владимирович**, к.т.н., доцент кафедры «Мехатроника, механика и робототехника» Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, e-mail: gorin57@mail.ru.

**Rodichev Alexey Yurievich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Service and Repair of Machines", Turgenev State University, e-mail: rodfox@yandex.ru.

**Gorin Andrey Vladimirovich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Mechatronics, Mechanics and Robotics, Turgev State University, e-mail: gorin57@mail.ru.

**Токмакова Мария Андреевна**, аспирант Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, e-mail: tokmakova2303@gmail.com.

**Киричек Алексей Андреевич**, магистрант Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, e-mail: alexkirichek@yandex.ru.

**Tokmakova Maria Andreevna**, Post graduate student, Turgenev State University, e-mail: tokmakova2303@gmail.com.

**Kirichek Alexey Andreevich**, Master degree student, Turgenev State University, e-mail: alexkirichek@yandex.ru