

УДК (УДК) 629.11

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФФУЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ДЛЯ
ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИНPROSPECTS FOR APPLICATION OF DIFFUSION ALLOYING FOR WORKING
BODIES OF CONSTRUCTION AND ROAD MACHINESОвсянников В.Е., Васильев В.И., Фролов В.А.
Ovsyannikov V.E., Vasiliev V.I., Frolov V.A.Курганский государственный университет (Курган, Россия)
Kurgan state university (Kurgan, Russian Federation)

Аннотация. Дорожно-строительные работы характеризуются довольно неблагоприятными условиями с точки зрения характера изнашивания. Такая ситуация в большей степени порождается сухим трением и преобладанием абразивного износа. Поэтому детали, которые контактируют с рабочей средой, можно классифицировать как быстроизнашивающиеся. Одним из наиболее эффективных путей повышения долговечности является использование поверхностного упрочнения. При этом можно использовать дешевый материал, на поверхности которого формируется слой с повышенными механическими свойствами. В работе рассматриваются вопросы применения серого чугуна с упрочненным слоем для решения указанной проблемы. В работе были проведены экспериментальные исследования износостойкости деталей из феррито-перлитного серого чугуна с упрочненным слоем. На основе расчетов определена долговечность деталей рабочих органов, содержащих износостойкие вставки из рассматриваемого материала. Показано, что использование предлагаемых решений позволяет получить результаты, сопоставимые с легированным высокопрочным чугуном и белохромистыми чугунами. Рассмотрены вопросы оценки свариваемости износостойких вставок и стальной основы. Показано, что можно получить сварное соединение с использованием ручной дуговой сварки. Результаты оценки экономической эффективности показали, что затраты на изготовление износостойких элементов из серого чугуна с упрочненным слоем ниже, чем использование традиционных методов упрочнения (например, наплавки).

Ключевые слова: строительно-дорожные машины, износ, рабочие органы, чугун, упрочнение

Дата принятия к публикации: 10.07.2020
Дата публикации: 25.09.2020

Сведения об авторах:

Овсянников Виктор Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Курганский государственный университет,
e-mail: vik9800@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8775-0781

Abstract. Road construction works have quite unfavourable conditions in terms of wear and tear. This situation is more caused by dry friction and the prevalence of abrasive wear. Therefore, parts that contact the working environment can be classified as fast-wear. One of the most effective ways to improve durability here is to use surface hardening. It is possible to use a cheap material on the surface of which a layer with improved mechanical properties is formed. The work deals with the use of grey iron with a reinforced layer to solve the above problem. The purpose of the work is to study the applicability of grey cast iron with a strengthened layer in the structures of working tools of construction and road machines. The work carried out experimental studies of wear resistance of parts made of ferrite-pearlite grey cast iron with a strengthened layer. On the basis of the calculations, the durability of the parts of the working tools containing wear-resistant inserts from the material under consideration is determined, it is shown that the use of the proposed solutions allows to obtain results comparable to the light high-strength iron and white iron. Issues of evaluation of weldability of wear-resistant inserts and steel base are also considered in the work. It is shown that it is possible to obtain a weld joint using manual arc welding. The results of the evaluation of economic ef-selectivity showed that the cost of bending wear-resistant elements from grey iron with a strengthened layer was lower than the use of hardening techniques (for example, build-up).

Keywords: construction and road machines, wear and tear, working tools, cast iron, hardening

Date of acceptance for publication: 10.07.2020
Date of publication: 25.09.2020

Authors' information:

Victor E. Ovsyannikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department “Automation of production processes” at Kurgan State University, e-mail: vik9800@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8775-0781



Васильев Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», Курганский государственный университет, e-mail: vvprof@rtural.ru
ORCID: 0000-0002-1130-2181

Фролов Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и автоматизация сварочного производства», Курганский государственный университет, e-mail: imk@kgsu.ru
ORCID: 0000-0001-7514-359X

Valeriy I. Vasiliev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department "Motor transport" at Kurgan state university, e-mail: vvprof@rtural.ru
ORCID: 0000-0002-1130-2181

Victor A. Frolov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department "Technologic and automation welding processing" at Kurgan State University, e-mail: imk@kgsu.ru
ORCID: 0000-0001-7514-359X

1. Введение

Дорожно-строительные работы характеризуются довольно неблагоприятными условиями с точки зрения характера изнашивания. Такая ситуация в большей степени порождается сухим трением и преобладанием абразивного износа [1, 2]. Поэтому детали, которые контактируют с рабочей средой можно классифицировать как быстроизнашивающиеся. В их число входят и детали рабочих органов (коронки зубьев, накладки на отвалы и т.д.).

Для абразивного износа характерно участие в процессе трения частиц высокой твердости, которые имеют различную форму, размеры, структуру, механические свойства, а также могут обладать незначительно адгезией [1, 2]. Трение в данном случае характеризуется нестационарным контактом с поверхностью изнашивания и значительной концентрацией напряжений.

Установлено, что в случае абразивного изнашивания необходимо обеспечить оптимальное соотношение между твердостью изнашиваемого материала и абразивной среды [1 - 4]. Также важным фактором является структура материала и вид термической обработки. Также на износостойкость влияет характер нагрузки и условия работы узла.

Согласно исследований [1 - 4] в зависимости от материала и условий работы ресурс рабочих органов различных машин колеблется в пределах от 4 до 300 моточасов.

Помимо прочего, износ режущих элементов вызывает рост усилий резания, увеличение нагрузок на силовые приводы строительно-дорожных машин, снижение производительности, рост расхода топлива и увеличение затрат на разработку грунта. Поэто-

му снижение интенсивности изнашивания и затрат на ремонт и восстановление таких элементов является действенным способом повышения эффективности эксплуатации строительно-дорожных машин [1, 2].

В конструкциях как базовых машин, так и рабочих органов строительно-дорожной техники достаточно широкое применение получил чугун. Данный материал обеспечивает довольно высокое сопротивление именно абразивному изнашиванию. Например, в тяжелонагруженных экскаваторах используются футерирующие элементы из чугуна для защиты ковша [5].

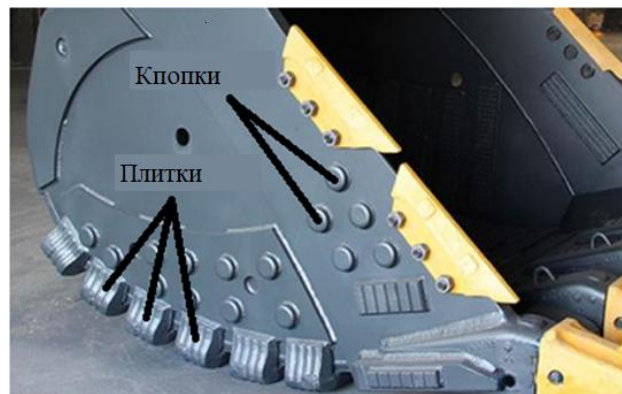


Рис. 1. Защита ковша экскаватора

При использовании указанных выше элементов защиты их выполняют двухкомпонентными – из стального основания и чугунной рабочей части. Чугун на стальное основание наносят посредством наплавки. Использование чисто чугунных элементов в данном случае не предполагается из-за трудности образования сварного соединения между защитным элементом и материалом ковша.

Также чугун используется для изготовления износостойких вставок и накладок на коронки, отвалы и т.д. Причем предполага-

ется использование дорогостоящих марок чугуна. Для повышения эффективности эксплуатации машин целесообразно рассмотреть возможность применения дешевого серого чугуна с поверхностным упрочнением.

Таким образом, основная идея, рассматриваемая в работе, заключается в том, что использование вставок из серого чугуна с упрочненным слоем должно повысить долговечность рабочих органов строительно-дорожных машин и обеспечить качественное сварное соединение износостойкого элемента и основы (ковша, отвала и т.д.).

Целью работы являлось проведение теоретических и экспериментальных исследований повышения долговечности деталей рабочих органов строительно-дорожных машин на основе использования износостойких элементов из серого чугуна с упрочненным слоем.

2. Материалы и методы исследования

Расчетная схема для определения износа рабочих органов на примере землеройной машины приведена на рис. 1.

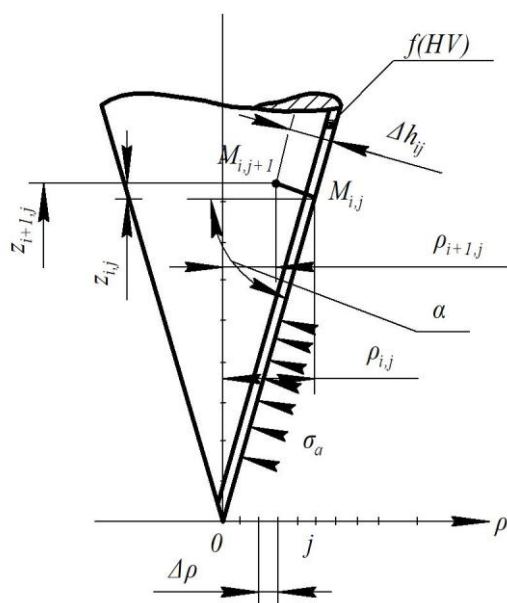


Рис. 1. Расчетная схема

Положение точки M на поверхности рабочего органа можно описать координатами $(\rho_{i,j}, z_{i,j})$. Изменение положения точки целесообразно определять итерационно (координаты $(\rho_{i,j}, z_{i,j})$). Выражение для опреде-

ления интенсивности изнашивания I_h имеет вид [6, 7]:

$$I_h = \frac{2 \cdot h^2 \cdot (R - h/3) \cdot n_a}{A_a \cdot a \cdot n_p},$$

где $h = \frac{12}{HB + 100} \sqrt{0.25 \cdot \pi \cdot a^2}$ – глубина вне-

дрения абразивных частиц; a – радиус контакта частиц грунта с поверхностью зуба; R – усредненный радиус абразивных частиц;

$n_a = \frac{4 \cdot A_a \cdot K_T}{\pi \cdot d^2 \cdot \beta^{2/3}}$ – число абразивных частиц,

взаимодействующих с рабочей поверхностью зуба; β – плотность грунта; K_T – коэффициент, учитывающий соотношение твердостей материала абразива и поверхности зуба; A_a – площадь контакта с абразивом; d – усредненный диаметр частица аб-

разива; $n_p = \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1} \cdot N_G^{-m}} \right)^{-m}$ – число циклов,

приводящих к разрушению материала, определяется из зависимости [8]; $\sigma_a = P/A_a$ – действующее напряжение; σ_{-1} – предел выносливости материала зуба; N_G – абсцисса перегиба кривой Велера; m – показатель для материала.

Учитывая, что в качестве материала зуба используется чугун с упрочненной поверхностью, величины h, n_a, n_p являются переменными (функциями от твердости). Тогда выражение для интенсивности износа примет вид:

$$I_h = \frac{2 \cdot h(HB)^2 \cdot (R - h(HB)/3) \cdot n_a(HB)}{A_a \cdot a \cdot n_p}.$$

Для расчета поверхность разбивается на участки по толщине. На каждом из участков твердость принимается постоянной.

Усилия определялись по известным зависимостям [9]. Расчеты проводились для упрочнения серого чугуна оксидами железа, хрома и молибдена, а также износостойких чугунов.

По полученным значениям интенсивности изнашивания ресурс работы узла можно определить по следующей зависимости:

$$\Delta t = \frac{\Delta h}{I_h \cdot V_k},$$

где V_k – скорость копания.

При экспериментальных исследованиях определялась удельная работа абразивного износа [10]:

$$a_{TP} = \frac{F \cdot L_{TP}}{\Delta m} = \frac{A}{\Delta m},$$

где a_{TP} – удельная работа абразивного износа; F – сила; L_{TP} – смещение пера самопишущего прибора от прилагаемой силы F .

Общая работа трения A может определяться как произведение средней силы трения на длину пути или по площади диаграммы трения. Первый метод требует установления зависимости смещения пера самопишущего прибора L_{TP} от величины прилагаемой силы F .

Использовать его можно при незначительно меняющейся силе. Более точно величину работы можно определить по формуле [10]:

$$A = \delta \cdot P_i,$$

где P_i – площадь диаграммной ленты, которую лучше определять взвешиванием из-за ее неправильной формы; δ – коэффициент пропорциональности.

Величина δ меняется при изменении условий трения, а в случае их постоянства достаточно стабильна [10]:

$$\frac{\Delta \delta}{\delta} \cdot 100\% = 3\%.$$

Образцы сваривались посредством ручной дуговой сварки в среде защитных газов. Пример образца приведен на рис. 2. Упрочненный слой виден невооруженным глазом.

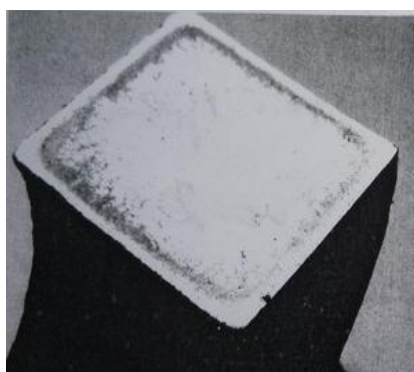


Рис. 2. Образец для сварки

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 3-6 приведены результаты расчетов интенсивности изнашивания для зубьев, содержащих износостойкие вставки из серого чугуна с различными видами упрочнения.

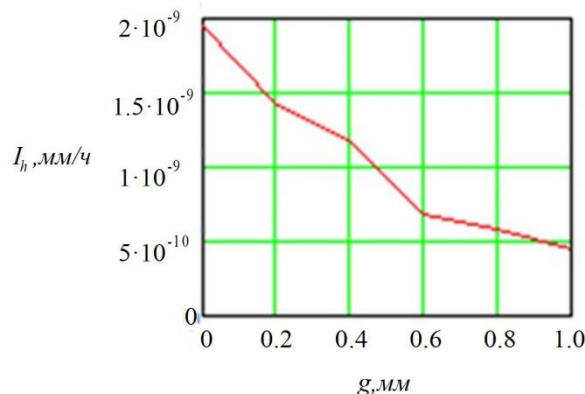


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания по толщине слоя (легирование FeO , грунт II категории)

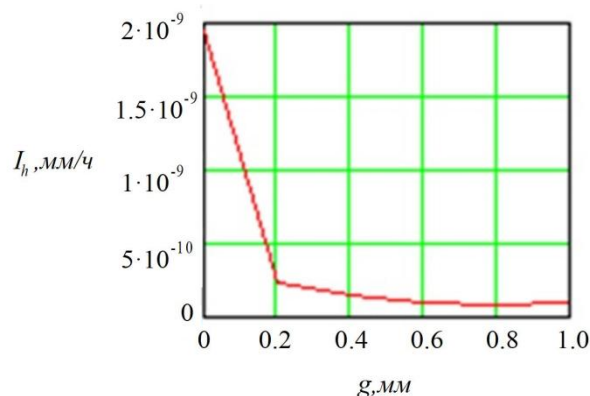


Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания по толщине слоя (легирование Cr_2O_3 , грунт II категории)

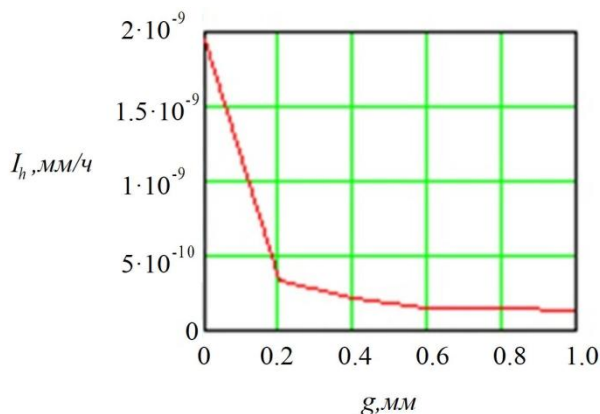


Рис. 5. Зависимость интенсивности изнашивания по толщине слоя (легирование MoO_2 , грунт II категории)

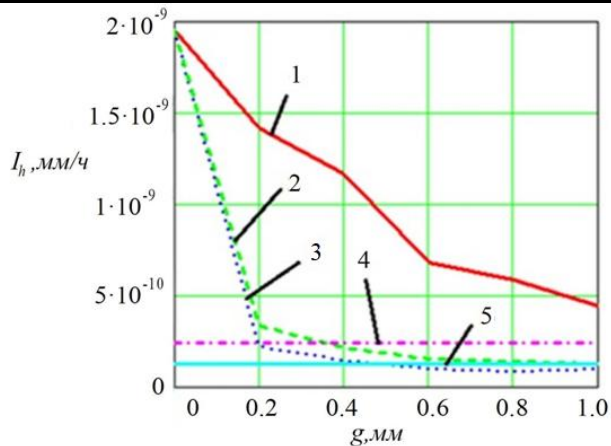


Рис. 6. Зависимости интенсивности изнашивания по толщине слоя (грунт II категории): 1 – серый чугун + упрочнение FeO ; 2 – серый чугун + упрочнение Cr_2O_3 ; 3 – серый чугун + упрочнение MoO_2 ; 4 – чугун ИЧХ-28; 5 – белохромистый чугун

Как можно видеть из рис. 6, использование оксидов хрома и молибдена дает возможность получить значения интенсивности

изнашивания, сопоставимые с износостойкими чугунами.

Применение оксида железа для упрочнения не дает высоких результатов ввиду того, что при введении в чугун хрома или молибдена, образуются твердые карбиды. При использовании для данных целей FeO таких карбидов нет.

Наилучших результатов с точки зрения повышения долговечности можно добиться с использованием оксида молибдена ввиду того, что данный вид поверхностного упрочнения дает возможность получать слой толщиной, более чем в 3 раза превышающей возможности от упрочнения в контакте с оксидами железа и хрома.

В табл. 1 приведены результаты определения удельной работы абразивного износа для различных марок чугуна и способов упрочнения.

Таблица 1

Удельная работа абразивного износа

Материал	Вид упрочнения	Термическая обработка	$A, Дж / мг$
СЧ-20	Без упрочнения	-	$0,15 \pm 0,06$
СЧ-20	Термодиффузионное поверхностное легирование в контакте с FeO + закалка	Время выдержки 8 часов при температуре $1100\text{ }^\circ\text{C}$	$0,33 \pm 0,19$
СЧ-20	Термодиффузионное поверхностное легирование в контакте с Cr_2O_3 + закалка	Время выдержки 8 часов при температуре $1100\text{ }^\circ\text{C}$	$5,57 \pm 0,19$
СЧ-20	Термодиффузионное поверхностное легирование в контакте с MoO_2 + закалка	Время выдержки 8 часов при температуре $1100\text{ }^\circ\text{C}$	$4,89 \pm 0,19$
Хромистый чугун (15% Cr)	Индукционная закалка	-	$6,83 \pm 0,27$

Как можно видеть из табл. 1, значения удельной работы абразивного износа для рассматриваемых марок материалов также сопоставимы. Таким образом, можно считать, что приведенные выше теоретические расчеты адекватны.

На рис. 7 и 8 приведены макро и микроструктура сварного шва, соединяющего два образца из упрочненного серого чугуна.

В ходе металлографических исследований было установлено, что дефектов в сварном шве не обнаружено. Это можно объяснить тем, что на поверхности упрочненного слоя имеется ферритная кайма, которая обладает хорошей свариваемостью.

Таким образом, при использовании серого чугуна с упрочненным слоем имеется возможность использования ручной дуговой

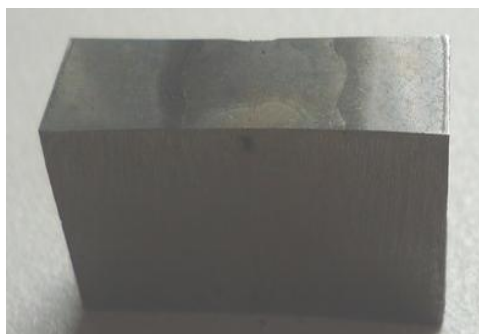


Рис. 7. Макроструктура сварного шва



Рис. 8. Микроструктура сварного шва, x500

сварки для закрепления износостойких вставок или накладок.

Анализируя конструкции рабочих органов строительно-дорожных машин с износостойкими вставками можно отметить, что сварка для закрепления вставок используется не всегда. Например, возможно изготовление цельнолитых узлов, когда вставки размещаются в литейной форме, после чего происходит заполнение жидким металлом. Пример такой конструкции представлен на рис. 9 [11].

Использование чугуна традиционных марок для изготовления вставок в данном случае имеет недостаток в том, что чугун имеет более низкую температуру плавления, чем сталь. Поэтому когда будет производиться заливка вставок сталью, произойдет их подплавление. При использовании чугуна с уп-

роченным слоем данного эффекта можно избежать из-за того, что ферритная кайма защищает вставку от расплавления.

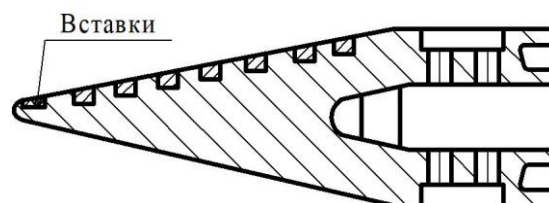


Рис. 9. Зуб с износостойкими вставками

4. Выводы

1. В результате расчетного определения интенсивности изнашивания рабочих органов землеройных машин было установлено, что использование износостойких вставок из серого чугуна с упрочненным слоем позволяет получать аналогичные результаты, что и применение легированных марок чугунов.

2. В ходе экспериментальных исследований по определению удельной работы абразивного износа были подтверждены результаты проведенных расчетов.

3. В ходе металлографических исследований было установлено, что дефектов в сварном шве не обнаружено. Это можно объяснить тем, что на поверхности упрочненного слоя имеется ферритная кайма, которая обладает хорошей свариваемостью. При этом возможно отказаться от использования двухкомпонентных защитных элементов.

4. В качестве направлений для дальнейших исследований можно выделить изучение сопротивления серых чугунов с упрочненным слоем ударным нагрузкам и разработку конструкций рабочих органов с использованием износостойких вставок или накладок из данных материалов.

Список литературы

1. Густов Ю.И. Триботехника строительных машин и оборудования. М: МГСУ, 2011. 197 с.
2. Зорин В.А. Основы работоспособности механических систем. М.: ИНФРА М, 2015. 380 с.
3. Завьялов А.М. Основы взаимодейст-

References

1. Gustov Yu.I. *Tribotekhnika stroitelnykh mashin i oborudovaniya* [Tribotechnics of construction machinery and equipment]. Moscow, Moscow state building university, 2011. 197 p. (In Russian).
2. Zorin V.A. *Osnovy rabotosposobnosti mekhanicheskikh sistem* [Mechanical Systems

- вия рабочих органов дорожно-строительных машин со средой: дис. ... док. технич. наук. Омск, 1999. 328 с.
4. Кузнецова В.Н., Завьялов А.М. Оптимизация формы рабочих органов землеройных машин. Омск: Наука, 2008. 180 с.
5. Рейш А.К. Повышение износостойкости строительных и дорожных машин. М.: Машиностроение, 1996. 352 с.
6. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
7. Макхамов К.Х. Расчет износостойкости машин. Ташкент: ТашГТУ, 2002. 144 с.
8. Колокольцев В.М., Мулявко Н.М., Вдовин К.Н. Абразивная износостойкость литых металлов и сплавов. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 228 с.
9. Шемякин С.А., Лещинский А.В. Расчеты землеройных машин. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2014. 55 с.
10. Гуревич Ю.Г., Овсянников В.Е., Фролов В.А. Влияние катализатора (железа) на взаимодействие оксидов с основой феррито-перлитного серого чугуна, обеспечивающее закалку и диффузионное легирование. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2013. 102 с.
11. Патент РФ на изобретение №2269628. Зуб экскаватора и способ его изготовления / Балашов В.Ф., Каждая Г.В., Каждая О.Г. Заявл. 01.12.2003, опубл. 10.02.2006. Бюл. № 4.
- † Operability Basics]. Moscow: INFRA-M, 2015. 380 p. (In Russian).
- † 3. Zavyalov A.M. Basics of interaction of working bodies of road construction machines with the environment. Diss. Doctor Sci. (Engineering). Omsk. 1999. 328 p. (In Russian).
- † 4. Kuznetsova V.N., Zavyalov A.M., Terentieva N.M. *Optimizatsiya formy rabochikh organov zemleroynykh mashin* [Optimization of the shape of earth-moving machine tools]. Omsk, Science, 2008. 180 p. (In Russian).
- † 5. Reysh A.K. *Povyshenie iznosostoykosti stroitelnykh i dorozhnykh mashin* [Increase in wear resistance of construction]. Moscow, Mashinostroenie, 1996. 352 p. (In Russian).
- † 6. Kragelsky I.V., Mihin N.M. Frictional units of machines. Moscow, Mashinostroenie, 1984. 280 p. (In Russian).
- † 7. Makhamov K.H. *Raschet iznosostoykosti mashin* [Calculation of wear resistance of machines]. Tashkent, Tashkent State Technical University, 2002. 144 p. (In Russian).
- † 8. Kolovtsev V.M., Mulyavko N.M., Vovin K.N. *Abrazivnaya iznosostoykost litykh metallov i splavov* [Abrasive wear resistance of cast metals and alloys]. Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University, 2004. 228 p. (In Russian).
- † 9. Shemyakin S.A., Leschinsky A.V. *Raschety zemlerojnykh mashin* [Calculations of digging machines]. Khabarovsk. Pacific National University. 2014. 55 p. (In Russian).
- † 10. Gurevich Yu.G., Ovsyannikov V.E., Frolov V.A. *Vliyanie katalizatora (zheleza) na vzaimodeystvie oksidov s osnovoy ferritoperlitnogo serogo chuguna, obespechivayushchee zakalku i diffuzionnoe legirovanie* [Influence of the catalyst (iron) on the reaction of oxides with the base of ferrite-pearlite grey cast iron, providing quenching and diffusion alloying]. Kurgan, Kurgan state university, 2013. 102 p. (In Russian).
- † 11. Patent RU 2269628, E02F 9/28. *Sposob uprochneniya chugunnykh detaley* [The method of hardening cast iron parts]. Balashov V.F., Kajzdaya G.V., Kajzdaya O.G. Published 10.02.2006. (In Russian).