

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-5-106-113

УДК 621.9.048.6:621.794

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ВИБРАЦИОННЫХ МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

## ANALYSIS METHODS ON THE FORMATION OF VIBRATIONAL MECHANOCHEMICAL COATINGS

**Иванов Владимир Витальевич<sup>1</sup>**,

доцент, e-mail: vivanov\_dstu@mail.ru

**Vladimir V. Ivanov,**

assistant professor, e-mail: vivanov\_dstu@mail.ru

**Загутин Дмитрий Сергеевич<sup>1</sup>**,

доцент, e-mail: rostov-zd@mail.ru

**Dmitriy S. Zagutin**

assistant professor, e-mail: rostov-zd@mail.ru

**Попов Сергей Иванович<sup>1</sup>**,

доцент, e-mail: spopov1957@yandex.ru

**Sergey I. Popov**

assistant professor, e-mail: spopov1957@yandex.ru

**Останин Олег Александрович<sup>2</sup>**,

старший преподаватель, e-mail: oleg\_ostanin@mail.ru

**Oleg A. Ostanin,**

senior lecturer, e-mail: oleg\_ostanin@mail.ru

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет, 344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

<sup>2</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Аннотация:** Представлены исследования, связанные с физико-механо-химическими представлениями по формированию поверхностного слоя вибрационных механохимических покрытий. Вибрационные механохимические покрытия являются неотъемлемой частью комбинированных методов обработки. Проведен анализ существующих методов по формированию вибрационных покрытий и используемого при этом вибрационного оборудования, используемое в практическом и реальном секторе экономики. Описаны преимущества вибрационных механохимических покрытий перед традиционными методами нанесения покрытий. На основании проведенного анализа и исследований в области нанесения вибрационных механохимических покрытий разработана классификация в зависимости от энергетической емкости системы (характера и интенсивности процессов, происходящих между основой и покрытием). Проведены сравнительные испытания вибрационных механохимических покрытий (ВМХП) сформированных на вибрационном оборудовании и покрытий, полученных традиционными способами (гальваника, ручное нанесение и т.д.) показан ряд неоспоримых преимуществ и показателей качества вибрационных покрытий.

**Ключевые слова:** Комбинированные методы обработки, вибрационная обработка, вибрационные механохимические (химико-механические) покрытия, виброволновая технологическая система, механические покрытия.

**Abstract:** The article presents studies related to physical, mechanical and chemical concepts of the formation of the surface layer of vibrational mechanochemical coatings. A brief analysis of the existing methods for the formation of vibration coating is presented. Vibration equipment used in the practical and real sector of the

*economy is shown. The advantages of vibrational mechanochemical coatings over traditional methods of coating are shown. On the basis of the analysis and research in the field of application of vibrational mechanochemical coatings, a classification is developed depending on the energy capacity of the system (the nature and intensity of the processes occurring between the substrate and the coating). The comparative tests of vibration mechanochemical coatings (Vimhp) formed on this vibration equipment and coatings obtained by traditional methods (electroplating, manual application and .etc.) shows a number of advantages and indicators of the quality of vibration coatings.*

**Keywords:** combined processing methods, vibration processing, vibrational mechanochemical (chemical-mechanical) coatings, vibration wave technological system, mechanical coatings

## Введение

Анализ причин выхода из строя деталей машин показывает, что разрушение деталей, в большинстве случаев, начинается с поверхностного слоя, так как поверхностные слои испытывают максимальное напряжение от внешних нагрузок. Сопротивление разрушению зависит от качества поверхности, которое определяется совокупностью таких характеристик как шероховатость, физико-механическое состояние и микроструктура поверхностного слоя металла. Качество поверхности оказывает решающее влияние на развитие усталостных явлений, коррозию и другие процессы, возникающие при эксплуатации машин. [1,11,21].

## Основная часть

Вибрационные механохимические покрытия являются неотъемлемой частью комбинированных методов обработки. Интерес этого направления возрастает в связи с созданием новых видов изделий, возникновением новых требований к качеству поверхности, для удовлетворения которых традиционные пути не всегда оптимальны.

Вибрационные механохимические покрытия (ВиМХП) имеют следующие преимущества перед традиционными методами нанесения покрытий:

- одновременная механическая обработка поверхности, хороший внешний вид покрытия;
- повышенная коррозионная стойкость;
- повышенная износостойкость;
- простота конструкции оборудования вследствие отсутствия токоподводов;
- не происходит наводороживания изделий;
- возможны покрытия «трудно покрываемых» металлов;
- возможно соосаждения различных металлов;
- использование малого количества электролита;
- менее жесткие требования к предварительной подготовке поверхности.

Эффективность метода вибрационной механохимической обработки определяется, в основном, следующими факторами: амплитудой и частотой колебаний, материалом и формой рабочей среды, а также применяемым типом оборудования.

В зависимости от вида покрытий эти факторы могут изменяться в широких пределах, изменяя, тем самым, интенсивность прилагаемой энергии [2,10,].

Метод вибрационной обработки с одновременным нанесением покрытия представляет собой механохимический процесс, при котором частицы рабочей среды, совершая вращательно-колебательные движения при их соударении, вызывают упруго-пластическую деформацию поверхностных слоев металла. При этом, в зависимости от применяемых усилий, наблюдается сьем окислов металла, сглаживание микронеровностей, улучшение физико-механических свойств поверхностных слоев (микротвердость, остаточные напряжения, структура), повышение  $t^{\circ}$  в зоне соударений.

В процессе обработки детали занимают разное положение в рабочей камере, что обеспечивает равномерную обработку всех участков поверхности.

В качестве рабочих сред, в зависимости от назначения операций, используются абразивные, металлические, стеклянные, органические и другие материалы, которые, вращаясь вместе с деталями, удерживают их во взвешенном состоянии, предотвращая забоины, а своим давлением и скольжением выравнивают и сглаживают поверхность.

При необходимости в рабочую камеру могут подаваться непрерывно или периодически жидкие растворы, суспензии или порошковые материалы. При этом виброволновое воздействие на обрабатываемые поверхности и растворы существенно интенсифицирует физико-химические процессы. Создаются условия как для протекания процессов механической обработки в виде упруго-пластического деформирования, так и физико-химических процессов - химических реакций, адсорбции, диффузии, адгезии.

К настоящему времени разработан ряд технологических процессов, позволяющих проводить вибрационную обработку с одновременным нанесением покрытий. В работе [2,13,14] приводятся результаты нанесения металлических покрытий из порошковых материалов в условиях вибрационной механико-термической обработки. Для получения медного покрытия в термокамеру, обеспечивающую температуру 180-200<sup>0</sup> С загружается рабочая среда - закаленные шары из стали ШХ-15, обрабатываемые детали и медный порошок. Этот метод позволяет получать равномерное покрытие на деталях различной конфигурации, а механиче-

ское воздействие частиц рабочей среды создает упрочненный приповерхностный слой, что в свою очередь повышает выносливость деталей [7,8]. Медное покрытие, полученное вибрационным способом, визуально не отличается от гальванического [3]. Аналогичным образом термовибрационным методом получено алюминиевое покрытие на стальной подложке [25]. При совмещении методов в условиях повышенных температур исследована возможность нанесения покрытий меди, кобальта, карбида бора, цинка, титана на различные металлические подложки [22].

Особенность виброобработки состоит в том, что поверхность деталей, находящихся в рабочей среде, очищается от различного рода загрязнений; окислов и обладает повышенной активностью [3,23]. Это свойство используется не только для нанесения на поверхность тонких слоев металлов, но и других материалов, обладающих специальными свойствами (например, износостойкими, антифрикционными и др.).

Виброволновое воздействие применяется также, для нанесения фосфатных покрытий, причем этот процесс может совмещаться с одновременной очисткой поверхности от окислов, загрязнений и удалением заусенцев [20,24].

В результате обработки образцов в указанных условиях на их поверхности образовался ровный и прочный слой фосфатной пленки, сравнимый с эталоном [3].

**Исследования** процессов происходящих при формировании ВиМХП неотъемлемо связаны с фундаментальными проблемами механохимии. Одним из факторов кинетики является механическая активация коррелирующая все процессы механохимии при образовании покрытий.

В основу механической активации положено два основных принципа: импульсивный характер процесса во времени [1] и локальный характер механического воздействия на вещество [4, 5, 6] (при механической обработке поле напряжений возникает не во всем объеме металлической частицы, а на ее контакте с другой частицей или рабочей средой).

Доля каждого канала зависит от условий нагружения (подведенной энергии, скорости нагружения), физических свойств твердого тела, температуры обработки и т.д. Иногда канал релаксации может изменяться по ходу процесса [4].

При ВиМХО активация поверхности металла осуществляется в результате пластического деформирования, увеличения плотности дислокаций и образования активных центров, разрушения окисных пленок и образования ювенильных участков поверхности [6].

Одновременно происходит активация не только обрабатываемой поверхности, но и молекул, которые, получив дополнительную энергию становятся активными. [12,28] Избыточная энергия может быть в молекуле в различных формах, это

может быть:

- повышенная кинетическая энергия поступательного или вращательного движения;
- повышенная энергия взаимного колебания атомов или атомных групп, составляющих молекулу;
- повышенная энергия движения тел или электронов. Энергия электронов атомов может повышаться при разрыве валентной связи; активация может осуществляться при химических взаимодействиях; при ударах молекул о стенку сосуда и др. [22,26,27]

При нанесении механохимических покрытий в результате виброволнового воздействия молекулы реагирующих веществ возбуждаются, т.е. увеличивается их внутренняя энергия, в результате чего доля активных молекул и ионов –  $E/RT$  приводит к качественному увеличению эффективных столкновений, благоприятно сказывается на структуру поверхностного слоя покрытия [3,4,17,29,30].

Исследования поверхностного слоя данных покрытий показало, что в результате контакта рабочей среды с поверхностью детали обеспечивается активация химических процессов протекающих в поверхностном слое при формировании покрытий, а также происходит изменение геометрических и физико-механических характеристик материала.

На основании проведенного анализа и исследований в области нанесения вибрационных механохимических покрытий разработана классификация в зависимости от энергетической емкости системы (характера и интенсивности процессов, происходящих между основой и покрытием):

1. На молекулярном уровне материал покрытия стоек к деформации, обладает химической и термической стабильностью. Закономерностью образования такого рода покрытий является воздействие рабочей среды при максимальных режимах обработки. В качестве рабочих сред используют металлические шары различного диаметра.

2. На электронно, ионном уровне основа и материал покрытия взаимодействуют между собой на энергетическом уровне, образуют прочное соединение. Закономерностью формирования данного рода покрытий является совместное воздействие двух видов энергии, механической и химической одновременно отвечающих за процесс формирования покрытия. Режимы работы оборудования средние в качестве рабочих сред используют различные материалы фарфоровые, стеклянные, керамические, металлические шары. Покрытие формируется на поверхности металла.

3. На химическом уровне основной металл, вступает в химическое взаимодействие с рабочим раствором, образуя покрытие. Основой в формировании данного рода покрытий является химическая составляющая процесса. Время образования покрытия должно быть в несколько раз меньше чем скорость съема металла в данном случае

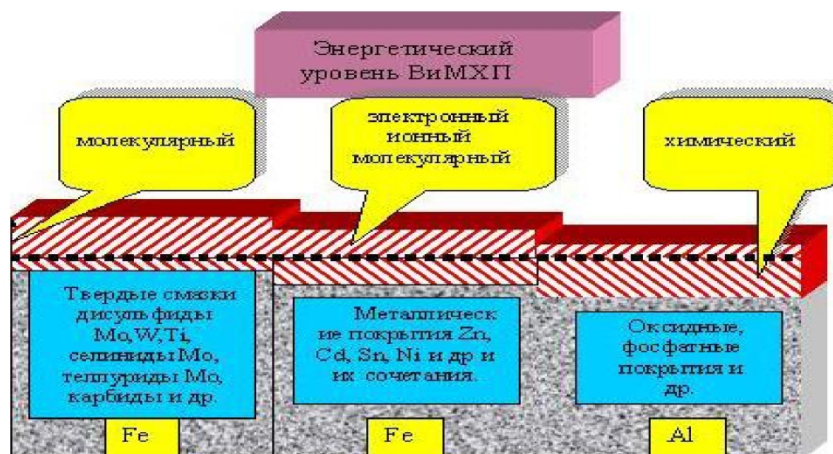


Рис.1. Схема энергетического уровня ВиМХП.



а



б

Рис. 2. а– Вибрационный станок общего назначения прямоугольной формой рабочей камеры, б- Вибрационный станок с тороидальной формой рабочей камеры.

механическая составляющая способствует активации процесса. Режимы работы оборудования мягкие амплитуда колебания 1-3 мм частота 16-30 герц. Материал рабочих сред полиэтилен, пластик, стекло различной формы. Рост покрытия происходит в глубину металла. На (рис.1) представлена схема энергетического уровня системы покрытий.

Критерием к выбору вида и способа получения покрытий является нормативная документация (ГОСТ, ОСТ, ТУ) учитывая физико-механические и химические свойства покрываемого материала, обеспечивающего качество и эксплуатационные характеристики в конкретных условиях. Также необходимо учитывать технологические особенности оснащение процессов вибрационной обработки, в том числе и нанесения вибрационных механохимических покрытий, включающие оборудование (вибрационные станки, установки, машины), инструменты (рабочие среды), дополнительные устройства (средства загрузки и разгрузки рабочей среды, отделение деталей от рабочей среды), приспособления (закрепление и ориентация обрабатываемых деталей) [18,19]. В отечественной и зарубежной практике разработан достаточно обширный типаж техно-

логического оснащения. С учетом большого многообразия обрабатываемых деталей их размеров и формы, изготавливаются вибрационные станки с объемом рабочей камеры от 1...5 до 25000...28000  $\text{дм}^3$ . Существуют две принципиально отличных конструктивных схемы вибрационных станков [3,18,19]: с прямоугольной (рис. 2.а) и кольцевой (торовой) (рис.2.б) формой рабочей камеры.

Данный тип станков достаточно хорошо зарекомендовал себя как на крупных предприятиях, так и на малых. Проведенные сравнительные испытания ВиМХП сформированных на данном оборудовании и покрытий полученных традиционными способами (гальваника, ручное нанесение и т.д.) показали ряд неоспоримых преимуществ и показателей качества вибрационных покрытий. Так например установлено, что дисульфид молибдена нанесенный кистью не измельчен, следовательно внедрение его в микро/нано профиль поверхности металла невозможен, что непосредственно влияет на адгезионную прочность, антифрикционные свойства и долговечность покрытия. Для сравнения на (рис. 3) представлены морфологические особенности поверхности покрытия.

Для сравнения на (рис.4.) представлен шлиф



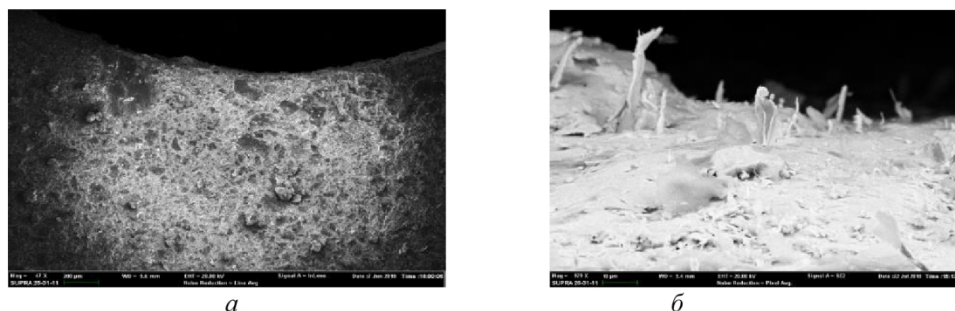


Рис.3. Шлиф покрытий: а - Морфология поверхности пленки  $BiMxTiP MoS_2$ , масштаб 20 мкм. б - нанесенного кистью масштаб 10 мкм.

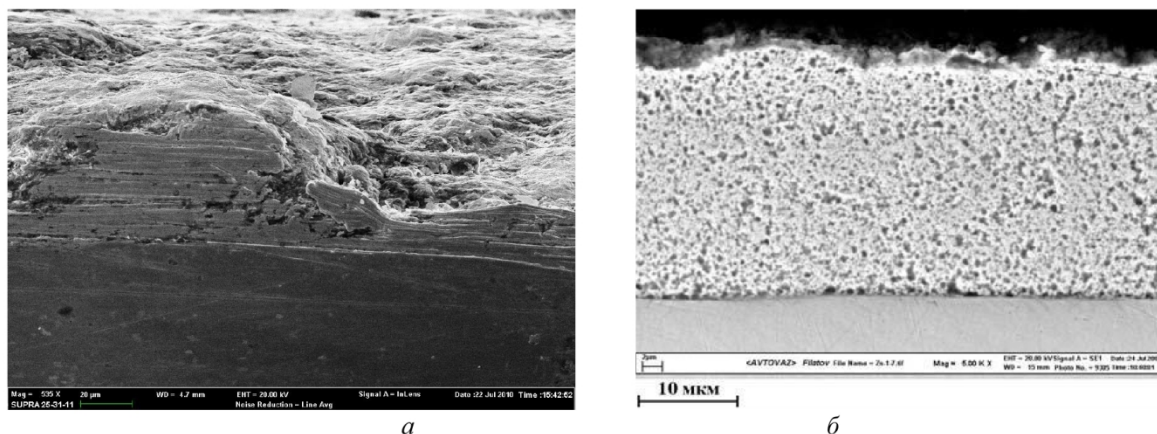


Рис. 4. Шлиф; а- $BiMxTiP$ , масштаб-20 мкм; б- гальванического цинкового покрытия, масштаб- 10 мкм.

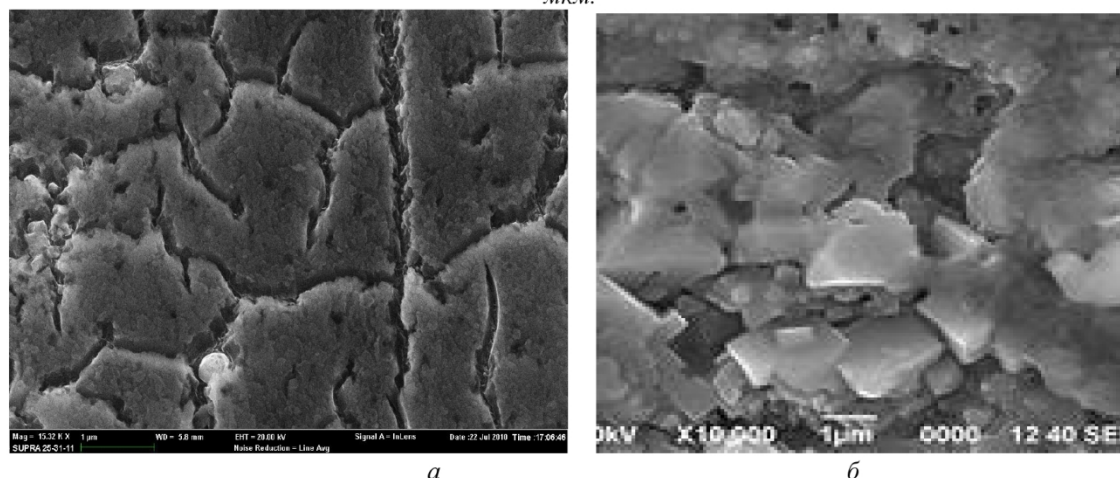


Рис.5. Вид оксидной пленки, полученной в процессе вибрационного воздействия. а- сплав алюминия АЛ-9,  $A = 2,5$  мм.  $T-20$  мин., масштаб -1 мкм. б - поверхность оксидного покрытия, полученного традиционным  $T-20$  мин способом, масштаб - 1мкм.

покрытий, где видна разница в микроструктуре  $BiMxTiP$  и цинкового покрытия, полученного гальваническим методом. Присутствует резкая граница между покрытием и основным металлом (рис. 4.б) что снижает адгезионную прочность сцепления, а следовательно и коррозионную стойкость.

Для сравнения на (рис. 5.) представлена морфология поверхности вибрационного механохимического оксидного покрытия и оксидного покрытия полученного в стационарной ванне. Рас-

положение ячеек хаотично, разница в размерности значительна (рис.5, б) присутствуют углубления различной диаметра, модификация при такой структуре в частности танином с целью увеличения коррозионной стойкости затруднена.

Приведенные примеры дают возможность рассматривать данное направление как достаточно перспективное как с точки зрения себестоимости покрытий, экологичности процесса нанесения, так и эксплуатационных свойств поверхностного слоя покрытия.

### Выводы

Установлены преимущества ВиМХП по сравнению с традиционными технологическими процессами нанесения покрытий:

**-первая группа.** Сокращены три операции по сравнению с тех. процессом традиционным (механическое нанесение кистью или краскопультом). Сравнение данных испытаний нормами средней стойкости, показывает, что увеличение стойкости обработанных деталей составляет 28%.

**-вторая группа.** Сокращены такие операции, как химическое и электрохимическое обезжиривание, а также активация детали, в традиционном гальваническом процессе, совмещаются и протекают одновременно при ВиМХП. Также одним из преимуществ является то, что детали не нуждаются в подготовке поверхности под покрытие при помощи кислот, следовательно, полностью исключается водородная хрупкость покрытия.

**-третья группа.** За счет повышенной активности обрабатываемой поверхности и компонентов технологической жидкости возможно исключить из технологического цикла операции подготовки поверхности деталей под покрытие (обезжиривание, травление, осветление, промывки горячие и холодные 7 единиц оборудования). При этом снижаются затраты производства на оборудование, исключаются затраты на обслуживание подготовительных операций и стоимость материалов для приготовления и эксплуатации растворов.

Изучение механохимии при ВиМХП показало, что в условиях высокой активности, измельчении порошка и повышенных контактных и температурных нагрузок возможно, по мимо сил Вандер-Ваальса проявления электростатических сил, обусловленных высоким сродством некоторых элементов, в частности к электрону.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аввакумов Е.Г. Механохимический синтез в неорганической химии. Новосибирск: Наука, 1991г
2. Бабичев А.П. Иванов В.В., Бурлакова В.Э., Филиппук О.С. Исследование микро/нанопрофиля цинкового покрытия при вибрационной механохимической обработке углеродистых сталей. // Упрочняющие технологии и покрытия, 2014. - №7. с.46-49.
3. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Изд.2е, перераб. и доп. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008г. – 694с.
4. Бутягин П.Ю. В сб. «Механохимический синтез в неорганической химии» под редакцией Е. Г. Аввакумова, Новосибирск: Наука, 1991, с 32–40.
5. Болдырев В.В. Исследования по механохимии твердых веществ// Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева, 2009 г. С 34-40.
6. Бутягин П.Ю. Разупорядочение структуры и механохимические реакции в твердых телах // Успехи химии, 1984, Т 53, с 581-589
7. Блюменштейн В.Ю., Петренко К.П. Исследование влияния программ нагружения на шероховатость поверхности процессах ППД // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. №8. С. 254-258
8. Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования сложнопрофильных инструментов для упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Наукоемкие технологии машиностроения. – 2017. – №8. – С. 7-16.
9. Blumenstein V.Yu, Mahalov M.S, Shirokolobova A.G. Finite Element Modeling of Strengthening Process by Means of Surface Plastic Deformation Using a Multiradius Tool. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 253 (2017), 012017. doi:10.1088/1757-899X/253/1/012017
10. Blumenstein V., Mahalov M., Ostanin O. Simulation and Calculation of Residual Stresses in Mining Machines Components. E3S Web of Conferences 41, 03012 (2018). doi:10.1051/e3sconf/20184103012
11. Безъязычный В.Ф. Основы технологии машиностроения: учеб. для вузов / В.Ф. Безъязычный. М.: Машиностроение, 2013.– 568 с.
12. Бутенко В.И. Локальная отделочно-упрочняющая обработка поверхностей деталей машин. Таганрог: ТРТУ, 2006. -126 с.
13. Иванов В.В. Вибрационные механохимические методы нанесения покрытий (цинкование) / В.В. Иванов. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2010. 8,9п.л.
14. Иванов В.В., Попов С.И., Марченко Ю.В. Использование полимерных рабочих сред для формирования оксидной пленки в условиях виброобработки // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева.- 2018.- № 1(44).- С. 108-113.
15. Ivanov V.V., Popov S.I., Kirichek A.V. Investigation of optimal chemical composition of cast aluminum alloys for vibrational mechanical-chemical polishing and deposition of protective and decorative coatings // XI International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2017): IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 327, 2018. doi:10.1088/1757-899X/327/3/032026.
16. Ivanov V.V., Dontsov N.S., Kirichek A.V. Technological features of metallic zinc coatings obtained

during mechanochemical synthesis, implemented in conditions of vibro-wave technological systems // XI International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2017): IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 327, 2018. doi:10.1088/1757-899X/327/3/032025.

17. Lebedev V. A, Ivanov V.V. and Fedorov V P 2016 Morphological analysis of galvanized coating applied under vibrowave process system conditions. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 124. doi:10.1088/1757-899X/124/1/01216.

18. Загутин Д.С. Производственная безопасность Москва, 2017.

19. Шоркин В.А. Учет влияния тройного взаимодействия частиц среды на поверхностные и адгезионные свойства твердых тел / В.А. Шоркин, Л.Ю. Фроленкова, А.С. Азаров // *Металловедение*. 2011, №2. – С.2–7.

20. Тамаркин М.А. Формирование параметров качества поверхности при центробежно-ротационной обработке в среде абразива / М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, В.В. Друппов // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2007, №10. – С.19-24.

21. Смоленцев В.П. Справочник технолога-машиностроителя. – М., 2000. – Т.1-2.

22. Лебедев В.А. Энергетическая модель формирования вибрационных механохимических покрытий / В.А. Лебедев, В.В. Иванов, В.Д. Соколов и др. // *Наноинженерия*, 2013. №5 – С.11-17.

23. Киричек. А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: монография / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. М.: Машиностроение, 2004 - 287 с.

24. Гончаревич И.Ф. Вибрация – нестандартный путь / И.Ф. Гончаревич. М.: Наука, 1988. – 208 с.

25. Кадырметов А.М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров. Воронеж: ИПЦ «Научная книга».2013. - 260с.

26. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки / Е.В. Смоленцев. М.: Машиностроение, 2005.-511с.

27. Шумячер В.М. Повышение эффективности шлифования технической механики / В.М. Шумячер, О.В.Душко // *Russian Engineering Research*.2011. Т.36. Вып.9.

28. Янюшкин А.С. Технология комбинированного электроалмазного затачивания твердосплавных инструментов. М.: Машиностроение – 1, 2003. – 242 с.

29. Brooks A. Mechanical Plating / *Metal Finishing*. V.81, № 8 -P.53-57.

30. Davis E.A. Mechanically plated fasteners in bimetallic assemblies. // *SAE Technical papers series*. 1978.V. 53 № 78- P. 1–8

## REFERENCES

1. Avvakumov E. G. Mechanochemical synthesis in inorganic chemistry. Novosibirsk: Science, 1991
2. Babichev A. P., Ivanov V. V., Burlakova E. V., Filipchuk O. S. Investigation of micro/nanoprobes zinc coating under vibration mechano-chemical processing of carbon-rich steels. Scientific and technical journal "Strengthening technologies and coatings" - Moscow 2014. - №7. ISSN: 1813-1336 Pages.46-49.
3. The Basics of vibration technology. Ed.2nd, Rev. and DOP. – Rostov n/D: Publishing center DGTU, 2008. – 694с.
4. Butyagin in the "Mechanochemical synthesis in inorganic chemistry" edited by E. \_ Avvakumova, Novosibirsk: Nauka, 1991, from 32-40.
5. Boldyrev V. V. "Studies on Mechanochemistry of solids". Journal of the all-Union chemical society. D. I. Mendeleev, 2009 from 34-40.
6. Butyagin P. Yu., the structure Disordering and mechanochemical reactions in solids, *Uspekhi khimii*, 1984, T 53, 581-589
7. Blumenstein, V. Y., Petrenko, K. P. a Study of the impact of programs loading on the roughness poverhnostryu processes PPD Hardening technology and coatings. 2017. No. 8. C. 254-258
8. Blumenstein, V. Yu., Mechanics of technological inheritance as a scientific basis for designing complex tools for hardening treatment of surface plastic deformation of high-tech engineering technology. - 2017. - №8. – Pp. 7-16.
9. Blumenstein V. Yu, Mahalov M. S, Shirokolobova A. G. Finish Element Modeling of Strengthening Process by Means of Surface Plastic Deformation Using a Multiradius Tool. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 253 (2017) 012017 doi:10.1088/1757-899X/253/1/012017
10. Blumenstein V, Mahalov M, Ostanin O. Simulation and Calculation of Residential Stresses in Mining Machines Components.E3S Web of Conferences 41, 03012 (2018) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184103012>

11. Bezhyazichniy V. F. Fundamentals of manufacturing engineering: proc. for high schools / V. F. Bezhyazichniy. M.: Mechanical Engineering, 2013. - 568 p.
12. Butenko V. I. Local finishing and hardening treatment of surfaces of machine parts. Taganrog: TRTU, 2006. -126 p.
13. Ivanov V. V. Vibrational mechanochemical methods of coating (galvanizing) / V. V. Ivanov. - Rostov-on-don: publishing center, 2010. 8.9 PP.
14. Ivanov V. V., Popov S. I., Marchenko Yu. V. polymer production environments for the formation of the oxide film in terms of vibrating processing // Bulletin of Rybinsk state aviation technological Academy. P. A. Solov'eva. - 2018.- № 1 (44).- P. 108-113.
15. Ivanov V. V., Popov S. I., A. V. Kirichek Investigation of optimal chemical composition of cast aluminum alloys for vibrational mechanical-chemical polishing and deposition of protective and decorative coatings // XI International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2017); IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 327, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/327/3/032026 ahhh!
16. Ivanov, V. V., Dontsov, N. S., Kirichek, A. V. Technological features of Metallic zinc coatings, obtained during mechanical synthesis, implemented in conditions of vibration-wave of technological systems. // XI international Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2017); IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 327, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/327/3/032025 ahhh!
17. Lebedev V. A, Ivanov V. V. and Fedorov V P 2016 Morphological analysis of galvanized coating is applied under vibrowave process system conditions. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124 doi.10.1088/1757-899X/124/1/01216.
18. Sagutin D. S. safety Moscow, 2017.
19. Sorkin V. A. consideration of the effect of the triple interaction of the particles of the medium on the surface and adhesive properties of solids / V. A. Sorkin, frolenkova L. Yu., Azarov A. S. // metal Science. 2011, №2. - P. 2-7.
20. Tamarkin M. A. Formation of quality parameters of the surface when centrifugal rotary processing in the environment of abrasive / M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, V. V. Gruppov // Hardening technology and coatings. 2007, №10. - P. 19-24.
21. SMOLENTSEV V. p. Handbook of mechanical engineer. - M., 2000. - Vol. 1-2.
22. Lebedev V. A. energy model of formation of vibrational chemical coatings / V. A. Lebedev, V. V. Ivanov, V. D. Sokolov, etc. // Nanoinzheneriya, 2013. №5-P. 11-17.
23. Kirichek. A. V. Technology and equipment, static-pulse treatment of superficial plastic deformation: monograph / A.V. Kirichek, D. L. Soloviev, A. G. Lazutkin. M.: Mashinostroenie, 2004 - p. 287
24. Goncharevich I. Vibration-non-standard way. M.: Science, 1988. - 208 p.
25. Kudermetov A. M. the Management of technological providing of processes of plasma deposition of coatings in the mode of modulation of electrical parameters. Voronezh: CPI "Scientific book".2013. - 260s.
26. SMOLENTSEV E. V. Design of electrical and combined processing methods / E. V. SMOLENTSEV. M.: Mechanical Engineering, 2005.- 511s.
27. Shumyacher V. M. improving the efficiency of the grinding technical mechanics / V. M. Shumyacher, O. V. Dusko //Russian Engineering Research.2011.Vol. 36.Vol.9.
28. Yanyushkin A. S. Technology combined electrolyzing sharpening carbide tools. Moscow: Mashinostroenie-I, 2003. - 242 p.
29. Brooks A. Mechanical Plating / Metal Finishing. V. 81, No. 8-P. 53-57.
30. Davis E. A. Mechanically plated fasteners in bimetallic assemblies. // SAE Technical papers series. 1978.V. 53 No. 78 - P. 1-8

Поступило в редакцию 03.12.2018

Received 03 December 2018