

УДК 621.9.048.6:621.794

Иванов Владимир Витальевич¹, доктор техн. наук, доцент, **Лебедев Валерий Александрович**¹, канд. техн. наук, профессор, **Попов Сергей Иванович**¹, канд. техн. наук, доцент, **Донцов Николай Сергеевич**¹, канд. техн. наук, доцент, **Останин Олег Александрович**², старший преподаватель.

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

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

E-mail: vivanov_dstu@mail.ru

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Аннотация: В статье представлены исследования вибрационных химико-механических покрытий. Предложена энергетическая модель формирования покрытий в вибрационных технологических системах. Разработана классификация в зависимости от энергетической емкости системы (характера и интенсивности процессов, происходящих между основой и покрытием). Показаны преимущества вибрационных химико-механических покрытий перед традиционными методами нанесения (гальваника, ручное нанесение и т.д.) и область их практического применения. Показан ряд преимуществ и показателей качества, вибрационных химико-механических покрытий.

Ключевые слова: вибрационные химико-механические покрытия, вибрационная технологическая система, энергетическое воздействие, качество поверхности.

Информация о статье: принята 01 февраля 2019 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-3-12

Введение

Вибрационные химико-механические покрытия (ВиХМП) являются результатом комбинированного синтеза различных видов энергетического воздействия на поверхность металла. Отличительной особенностью ВиХМП от других способов нанесения покрытий является то, что их формирование происходит при механическом вибро ударном воздействии индентора (рабочей среды). В результате динамического воздействия обеспечивается активация химических и физико-химических процессов, протекающих в поверхностном слое, происходит изменение его геометрических и физико-механических характеристик [12,18-24]. Интерес к этим покрытиям связан с созданием новых видов изделий, возникновением новых требований к качеству поверхности и обусловлен рядом преимуществ перед традиционными методами нанесения покрытий такими как: одновременная механическая обработка поверхности, хороший внешний вид покрытия; повышенная коррозионная стойкость; повышенная износостойкость; простота конструкции оборудования вследствие отсутствия токоподводов; наводороживание

поверхностного слоя покрытия; возможны покрытия «трудно покрываемых» металлов; возможно осаждение различных металлов; использование малого количества химикатов в растворе; менее жесткие требования к предварительной подготовке поверхности. Для проектирования и практической реализации ВиХМП путём управления технологическими параметрами механического вибро волнового воздействия проведён комплекс исследований направленный на разработку модельных представлений механизма формирования вибрационных покрытий и определение их энергетического состояния; установление закономерностей их нанесения с учётом специфики и функционального назначения [6,7,8]

Методическая часть (теоретический аспект).

Одним из основных воздействий, определяющих формирование ВиХМП, является химический процесс, протекание которого возможно, если преодолен энергетический порог, при котором реакция осуществляется. Далее требуется дозированный подвод энергии. Управляемость этого процесса наиболее

полно обеспечивает механическое воздействие свободных инденторов. [9;13,15,16]

В общем виде энергетическая модель формирования ВиХМП может быть представлена в виде:

$$U_a > U_{mg} \pm U_{xg}, \quad (1)$$

где U_a – энергия, требуемая для протекания химической реакции; U_{mg} – механическая энергия, подводимая извне; U_{xg} – дополнительная энергия, подводимая для ускорения химической реакции (знак «+») или затрачиваемая (знак «–») на компенсацию потерь при прохождении химической реакции.

Граничным условием модели может служить критерий:

$$U_{mg} \leq U_{max}, \quad (2)$$

где U_{max} – предельные энергетические возможности механической составляющей процесса.

Анализ критериев (1) и (2) показывает, что требуется установить варианты химического воздействия, при которых внутренняя энергия будет иметь наибольший показатель, обеспечивающий протекание интенсивной химической реакции для достижения требуемого технологического показателя. Тогда внешняя механическая энергия может быть обеспечена путем ее регулируемого подвода в зону обработки, например волновым процессом. В этом случае потери энергии (минус U_{xg}) в формуле (1) могут быть снижены, что увеличит долю энергии (U_{mg}) на интенсификацию химических реакций и даст существенное энергосбережение процесса по формированию покрытия.

В соответствии с основным законом термодинамики – законом сохранения энергии, при ее превращениях уравнение энергетического баланса химико-механического процесса образования локального микрообъема покрытия на границе раздела «покрытие-подложка» можно записать:

$$\Delta U = \Delta U_{pm} + \Delta U_{px} + \Delta U_{tm} + \Delta U_{tx}, \quad (3)$$

где, ΔU_{pm} , ΔU_{px} – изменение механической и химической потенциальной составляющей внутренней энергии локального объема; ΔU_{tm} , ΔU_{tx} – часть тепловой энергии, затрачиваемой на повышение его энергетического состояния.

Соотношения между составляющими энергетического баланса химико-механического процесса при формировании ВиХМП могут быть самыми разнообразными и зависят от природы и структуры материала, а также условий, в которых протекает процесс нанесения покрытий. Рассматривая сформировавшийся в процессе ВиХМО на границе раздела «покрытие-подложка» модифицированный локальный микрообъем как открытую термодинамическую систему, находящуюся, при установившихся химико-механических условиях, в соотношении локального равновесия, условие его образования можно представить в виде:

$$\Delta U = U_0, \quad (4)$$

где $\Delta U, U_0$ – соответственно изменение мольной внутренней энергии системы и ее мольная энергия, определяющая условия образования модифицированного локального микрообъема.

С учетом метода избыточных величин Гиббса, интерпретацией энтропии Больцманом, а также изменением свободной энергии в локальном микрообъеме в процессе химического взаимодействия компонентов покрытия получена модель, раскрывающая механизм химико-механического синтеза формирования покрытий в условиях виброволновых технологических систем, определяющих энергетическое состояние локальных микрообъемов на границе «покрытие-подложка», модифицированных в процессе ВиХМО:

$$U_0 = TR \ln \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right) + 10^{-6} V_m \left(\frac{\sigma_3^2}{2E} + K_a \sigma_3 \frac{d}{D} \right) - \Delta G^\circ, \quad (5)$$

где τ – время пребывания системы в состоянии химико-механического воздействия; τ_0 – период тепловых колебаний атомов 10^{-12} с; V_m – молярный объем, мм³/моль; σ_3 – эффективное напряжение, МПа; E – модуль упругости, МПа; d – диаметр пластического отпечатка, формируемый на поверхности при ударе инденторов рабочей среды диаметром ϕD ; K_a – коэффициент учитывающий тепловой эффект; ΔG° – изменение свободной энергии Гиббса, кДж/моль.

Энергетическая модель учитывает вклад в процесс формирования ВиХМП поверхностного слоя связанной энергии за счёт роста энтропии (первое слагаемое), увеличения энергии упругопластических искажений кристаллической решётки в результате механического воздействия инденторов (второе слагаемое), изменения внутренней энергии поверхностного слоя, модифицированного в результате химического взаимодействия контактирующих сред (третье слагаемое). Роль каждого из них в кинетике формирования классификационных групп химико-механических покрытий описывается энергетической и типовыми моделями, из которых видно, что основной вклад в процесс формирования ВиХМП первой группы вносит деформационное слагаемое, монотонно растущее со временем. Формирование ВиХМП второй группы – результат деформационного и химического слагаемых. При формировании ВиХМП третьей группы ведущая роль принадлежит химической составляющей модели.

Основным показателем качества покрытия, наносимого на поверхность металла, является адгезия, которая характеризует прочность сцепления между двумя материалами, возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных веществ, приведённых в соприкосновение. Если приравнять мольную энергию, определяющую условия образования модифицированного локального микрообъема на границе раздела «покрытие-подложка», к средней энергии единицы связи, обеспечивающей его адгезию, то на основе энергетической модели получают расчётно-аналитическую модель технологической системы, обеспечивающей получение покрытия на поверхности материала, требуемого по условиям эксплуатации изделий:

$$E_a = TR \ln \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right) + 10^{-6} V_m \left(\frac{\sigma_3^2}{2E} + K_a \sigma_3 \frac{d}{D} \right) - \Delta G^\circ \quad (6)$$

Расчётно-аналитическая модель технологической системы нанесения покрытий позволяет на стадии технологической подготовки производства

решить ряд оптимизационных задач по проектированию технологических процессов, обеспечивающих получение требуемого, качества и эксплуатационных свойств поверхности деталей.

На основании расчетно-аналитической модели получена обобщенная формула для оценки продолжительности процесса (ВиХМО). В момент времени $\tau = \tau_n$, когда пластическая деформация поверхности, протекающая в процессе ударно-импульсного воздействия свободнодвижущихся инденторов становится предельной для данного материала, т.е. $d = d_{пр}$, а активность компонентов системы достигает

позатупного изучения закономерностей формирования ВиХМП «сверху-вниз» и «снизу-вверх» Исследования «сверху-вниз» предусматривали миниатюризацию традиционных микроскопических и микро-электромеханических исследований на основе усовершенствования методов и процессов, используемых традиционными технологиями с целью определения основных требований по ГОСТ к покрытиям; исследования «снизу-вверх» проводились для изучения нанопрофиля, структуры, морфологии поверхности покрытия, а также исследования наносимого материала.



Рис.1. Классификация вибрационных химико-механических покрытий

Fig. 1. Classification of vibration chemical-mechanical coatings

термодинамической константы равновесия, процесс образования вибрационного химико-механического покрытия завершается.

Выделив τ_n , получим обобщенную формулу для оценки продолжительности процесса, формирования ВиХМП:

$$\tau_n = \tau_0 \exp \left[\frac{E_a - 10^{-6} V_m \left(\frac{\sigma_z^2}{2E} + K_a \sigma_a \frac{d}{D} \right) - \Delta G^\circ}{RT} \right]. \quad (7)$$

Анализ природы контактирующих материалов; их физико-химических свойств; особенностей формирования каждого вида покрытий; соответствующих им динамических нагрузок; степени участия металлической основы в образовании покрытия, позволил ВиХМП классифицировать на 3 группы (рис. 1).

Из представленной на (рис.1.) классификации следует, что одни покрытия формируются путем механического сближения материала покрытия с поверхностью металла и удерживаются силами Ван-дер-Ваальса, другие формируются в условиях химической реакции, а при наличии в граничном слое электростатических сил процесс усложняется с образованием двойного электрического слоя, гидратацией. Однако для всех ВиХМП, независимо от сложности химических процессов, механическая энергия неизменно остается главной активирующей силой.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение.

В основу методологического подхода к проведению исследований был положен принцип

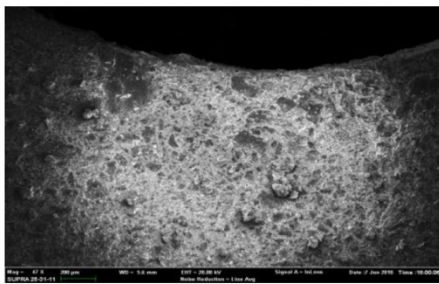
Предметом экспериментальных исследований основных классификационных групп ВиХМП являлись: структурно-фазовые превращения на макро и наноуровне, их корреляционная связь и влияние на структуру и функциональные свойства покрытия, влияния режимов и условий нанесения покрытий на характеристики качества и эксплуатационные свойства поверхностного слоя. Проведение экспериментальных исследований и обработка их результатов осуществлялась с использованием современных методик опробованных в экспериментальной практике.

Экспериментальные исследования проводились на виброустановке УВГ 4-10 с объемом камеры 10 л [9]. В качестве рабочих сред использовались

металлические, фарфоровые и стеклянные шары диаметром 2-10 мм. Исследования проводились при различных технологических условиях и режимах вибрации: амплитуда колебаний изменялась от 2 до 5 мм, частота колебаний – от 16 до 33 Гц. Покрытия наносились на образцы, изготовленные из следующих материалов: Ст3, Ст20, Ст40, ВТ20, АЛ9.

Вибрационные химико-механические твердосмазочные покрытия (ВиХМТП) на основе дисульфида молибдена MoS_2 . Особенность формирования покрытий данной группы заключается в том, что они наносятся на поверхность металла частицами рабочей среды путем внедрения мелкодисперсного сухого порошка, в поверхность детали. При вибро-волновом воздействии частицы рабочей среды, наносящие удары по обрабатываемой поверхности, обеспечивают сближение наносимого материала покрытия и поверхности металла в зоне контакта до возникновения сил молекулярного взаимодействия. Установлено, что формирование ВиХМП данной группы во многом зависит от интенсивности процессов, происходящих в зоне непосредственного контакта. Под действием нормальных и тангенциальных сил поверхностный слой металла деформируется, с одновременным внедрением частиц порошка.

В результате многократного ударно-импульсного воздействия частиц рабочей среды на поверхности формируется сравнительно равномерный слой пластически-деформированного активного



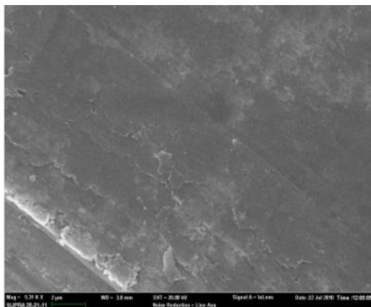
а)



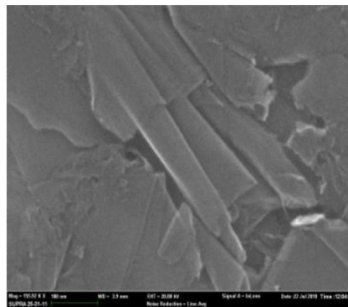
б)

Рис. 2. а- Морфология поверхности пленки ViXMTT MoS_2 , масштаб 20 мкм. б- нанесенного кистью масштаб 10 мкм.

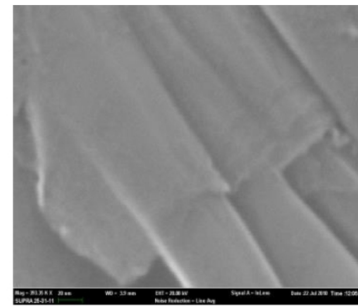
Fig. 2. a-surface Morphology of ViCMTC MoS_2 film, 20 μm scale. b-brush applied scale 10 μm .



а)



б)



в)

Рис.3. Поверхность материала с покрытием MoS_2 (разрешение на микро/наноуровне): а – масштаб 1 мкм, б – масштаб 100 нм, в – масштаб 20 нм.

Fig. 3. The surface of coated MoS_2 (micro/nanoscale) a-1 μm scale, b – scale 100 nm, v– scale is 20 nm.

металла с покрытием. Таким образом, увеличение внутренней энергии поверхностных слоев металла в результате пластической деформации приводит к повышению адсорбционной активности металлических поверхностей, что вытекает из модели формирования ViXMTT рассматриваемой группы, согласно которой первоначальный контакт частиц рабочей среды, покрытых MoS_2 , происходит по вершинам микронеровностей поверхности металла. В местах контакта формируются участки, покрытые MoS_2 . При дальнейшей обработке порошок заполняет впадины микронеровностей, образуя сначала рыхлый слой, который впоследствии уплотняется, и на поверхности получается равномерное покрытие, морфология которого представлена на (рис.2.а).

Для оценки качества полученного покрытия на (рис.2.б) приведено изображение покрытия дисульфида молибдена, нанесенного традиционным методом-кистью, который широко применяется на предприятиях машиностроения и авиастроения для деталей входящих в пары трения. Сравнительный анализ покрытий позволил выявить недостатки традиционного способа: наличие над поверхностью покрытия возвышающихся пластин дисульфида молибдена, свидетельствует о недостаточности усилий прилагаемых кистью для формирования уплотненного, равномерного покрытия; дисульфид молибдена не измельчен, что не позволяет обеспечить его внедрение в микро/нано профиль поверхности металла и как следствие высокую адгезионную прочность покрытия.

Исследования ViXMTT для деталей, работающих в условиях трения данной группы, показали, что адсорбированные частицы покрытия в зоне

контакта ориентируются базовыми плоскостями параллельно обрабатываемой поверхности, что видно на (рис.3). Такая ориентация частиц характерна для данной группы это предопределяет повышенные антифрикционные свойства поверхности, а следовательно, увеличение ресурса изделий в целом.

Существенное влияние на формирования покрытий оказывают амплитудно-частотные характеристики виброактивации процесса. Установлено, что максимальный рост покрытия наблюдается при амплитуде до 3 мм (рис.9.а). При обработки с амплитудами более 3 мм. толщина покрытия снижается. С увеличением частоты колебаний толщина пленки покрытия возрастает, в связи с увеличением количества микроударов в единицу времени. Активный рост покрытия происходит, в пределах 30 минут далее происходит стабилизация толщины покрытия и его уплотнение. При увеличении времени обработки более 120 мин толщина покрытия незначительно уменьшается вследствие его разрушения.

Внедрение данной технологии позволило увеличить ресурс деталей и надежность работы всего изделия на 15%, а также увеличить производительность и экологичность производства на 10%.

Особый интерес представляли процессы, происходящие на границе раздела «металл-покрытие», приготовление проб (порошка) производили по следующей методике. На образцы из отожженной стали ШХ 15 наносили вибрационное химико-механическое твердосмазочное покрытие (ViXMTT) MoS_2 . Затем, после удаления избытка порошка с поверхности образцов, покрытие очищалось механическим способом, а образовавшийся в процессе обработки поверхностный слой металла снимался.

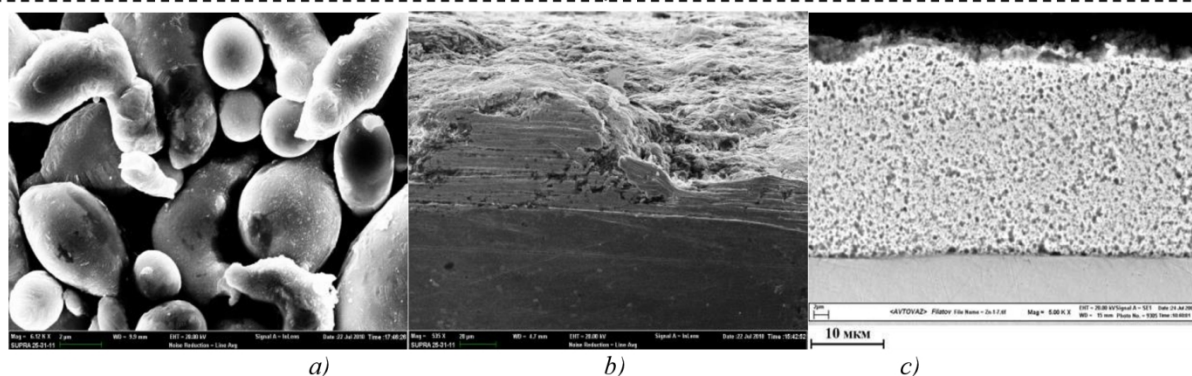


Рис. 4. а- порошок цинка, б- Шлиф; ВиХМЦП, масштаб-20 мкм; в-Шлиф; гальванического цинкового покрытия, масштаб- 10 мкм.

Fig. 4. a- powder of zinc, b- Cone; ViCMZC, scale 20 μm ; c - Cone; electroplating of zinc coating, scale - 10 μm .

Полученный таким образом порошок, состоящий из частиц MoS_2 и металла переходной зоны, исследовали разными методами.

Полученные данные показывают, что порошок в основном содержит дисульфид молибдена и материал подложки – αFe цементит Fe_3C . В то же время имеются линии, которые свидетельствуют о наличии в исследуемом порошке сульфидов FeS , FeS_2 и окислов железа FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 .

При тяжелых режимах трения на воздухе в зоне контакта в присутствии серосодержащих твердых смазок MoS_2 и WS_2 происходит образование сульфидов (FeS , FeS_2) и окислов железа. Как отмечалось выше, химическое взаимодействие происходит под действием высоких давлений или температур.

На основании проведенных рентгеноструктурных исследований можно предположить, что в данном процессе, благодаря большим контактными давлениями, превышающим предел текучести обрабатываемого материала, и температуре в зоне контакта, происходит химическое взаимодействие порошка MoS_2 с поверхностью детали на границе раздела «металл-покрытие». Образуется химически модифицированный граничный слой, содержащий сульфиды и частично окислы железа.

Установлено, что нанесение покрытия MoS_2 приводит к значительному уменьшению коэффициента трения с 0,24 в исходном состоянии, до 0,19 покрытого кистью, и до 0,04 при нанесении ВиХМП, и таким образом обеспечивает повышение износостойкости образца в 7 раз.

Вибрационные химико-механические цинковые покрытия (ВиХМЦП) Специфика формирования покрытий второй группы заключается в том, что между металлом и раствором в условиях динамической нагрузки, резко повышается активация поверхности металла, ионов, атомов, молекул – всех составляющих, участвующих в образовании покрытия. При этом молекулы и атомы приобретают дополнительную энергию, способствующую преодолению потенциального барьера, влияющего на скорость химических реакций.

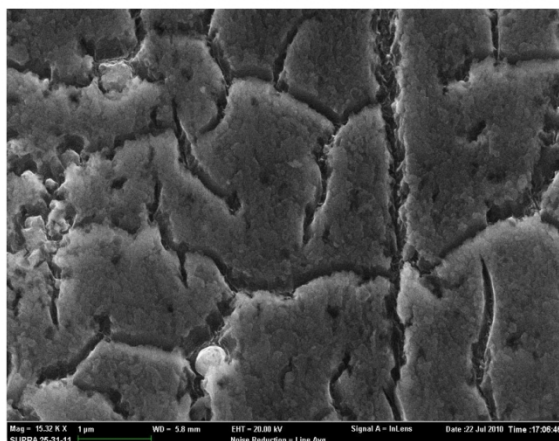
Они протекают через несколько стадий, включающих процессы диффузии, адсорбции, химической реакции, разряда и кристаллизации, участвующих в химическом процессе частиц. В процессе

виброволнового воздействия повышается энергетический уровень всей системы, что является предпосылкой для получения качественных покрытий. Активация поверхности происходит в результате механического воздействия рабочей среды (например, фарфоровых шаров). В зависимости от используемых режимов обработки, увеличивается активность ионов и молекул раствора. Здесь следует учитывать, что участки поверхности металла с высокой активностью адсорбируют ионы Zn^{++} , которые, разряжаясь, осаждаются в виде цинкового покрытия. Это определяет энергозатраты на химическую составляющую и должно быть учтено при проектировании тех. процесса [1,2,5,10,11].

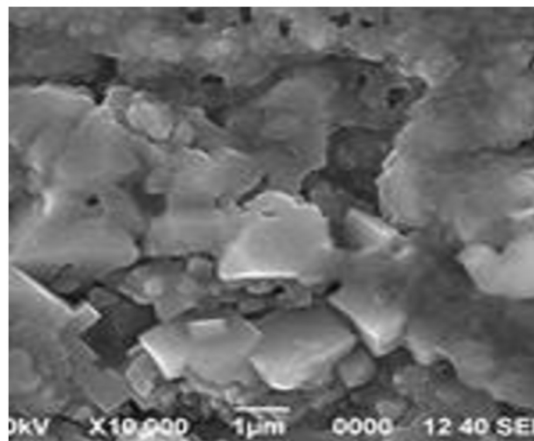
При формировании покрытия используют порошок цинка ПЦ-2 (рис. 4.а) – 50 г/л, и раствор хлорида цинка в количестве 100 г на 1 литр воды. Полученное покрытие имеет свои особенности (рис 4). Для сравнения на (рис. 4.б) представлен шлиф ВиХМЦП, а на (рис. 4.в) гальванического покрытия полученного в стационарной ванне без применения вибрации. Видна разница в микроструктуре ВиХМЦП и цинкового покрытия, полученного гальваническим методом. На (рис. 4.в) видна резкая граница между покрытием и основным металлом, очевидно, что это негативно влияет на адгезионную прочность сцепления, а следовательно, и коррозионную стойкость.

Для получения наибольшего эффекта и облегчения процесса нанесения ВиХМЦП на детали, рекомендуются следующие технологические режимы: на этапе нанесения покрытия очищенные и промытые детали загружать в герметически закрывающуюся рабочую камеру с фарфоровыми шарами диаметром 5-10 мм. Температура рабочего раствора может колебаться в диапазоне 290-298 К, при низких температурах (273-288К) время нанесения покрытия увеличивается на 15%. Режимы вибрационного воздействия: амплитуда колебаний 3 мм, частота колебаний 25 Гц, время 45-60 мин. После нанесения покрытия детали промывают холодной проточной водой и сушат теплым воздухом при необходимости.

С целью повышения коррозионной стойкости ВиХМЦП детали обрабатывали специальным химическим хроматным раствором состава, г/л: кислота азотная (HNO_3) – 2-5; ангидрид хромовый (CrO_3) – 25-55; натрий сернокислый (Na_2SO_4) – 15-20.



a)



b)

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

Fig.5. Type of oxide film obtained in the process of vibration. a-aluminum alloy AL-9, a = 2.5 mm. T-20 min., scale-1 µm. b-The surface of the oxide coating obtained by the traditional T-20 min method.–increase scale-1 mm.



Рис.6. Образцы деталей с BuXMOIP

Fig.6.Samples of parts with ViCMOC

Обработку проводили при температуре 288-300К в течение 0,1-0,3 мин. Далее детали промывали в холодной проточной воде, сушили в течение 6 мин при температуре 330К. Вибрационные химико-механические цинковые покрытия получают почти беспористыми, поэтому хромированную обработку для повышения их ресурса можно не проводить.

Вибрационные химико-механические оксидные покрытия (ВиХМОП) Особенность формирования данной группы покрытий заключается в том, что в результате скольжения частиц рабочей среды относительно поверхности деталей, происходит активация молекул оксидирующего раствора, за счет получения ими дополнительной энергии. Об активации молекул свидетельствует увеличение толщины оксидной пленки, полученной при ВиХМО 4,5-5 мкм, (без ВиХМО 3-3,5 мкм). ВиХМО сообщает ионам дополнительную энергию, необходимую для преодоления увеличивающегося расстояния между металлом и растущей оксидной пленкой. Процесс происходит по следующей схеме, участки поверхности обрабатываемого металла с высокой активностью адсорбируют гидроксил-ион OH^- , взаимодействуют с ним с образованием гидроксида алюминия по реакции



Эта реакция протекает с выделением водорода, удалению которого способствует вибрирующая

среда[13,14,16,18]. Покрытие имеет свою особенность. Для сравнения на (рис.5.) представлена морфология поверхности вибрационного химико-механического оксидного покрытия и оксидного покрытия, полученного в стационарной ванне. Морфология поверхности полученных покрытий имеет разную структуру так на (рис.5.а) видно, что ячейки и поры имеют строгие границы, на (рис.5.б) видно, что расположение ячеек хаотично, различия в размерности значительна присутствуют углубления различной размерности, модификация при такой структуре в частности танином с целью увеличения коррозионной стойкости затруднена.

В результате экспериментальных исследований определены оптимальные условия обеспечивающие получения покрытий данной группы: амплитуда колебаний - 2 мм; частота колебаний – 25 Гц; в качестве рабочей среды выбраны – полиэтиленовые гранулы 1-4 мм; время обработки-20 мин; температура раствора – 290К. При этом установлено, что повышение интенсивности обработки за счет увеличения амплитуды колебаний рабочей камеры выше 2,5 мм не целесообразно, т.к. ведет к разрушению оксидной пленки. Частота колебаний практически не влияет на толщину оксидной пленки.

Детали без подготовки поверхности загружались в вибрационную камеру с рабочей средой (полиэтиленовые шары, оксидирующий раствор) и

обрабатывались в течение 20 минут. После холодной и горячей промывки детали сушились на воздухе. Достигался требуемый цвет покрытия, ровный по всей поверхности не требующий дополнительной декоративной обработки. Это позволило до 2 раз снизить трудоемкость и обеспечить заданный ресурс работы изделий.

Приводимые примеры свидетельствуют о широких возможностях применения в промышленности комбинированных ВиХМП. [19]

Подведение итогов:

Область использования ВиХМП в различных отраслях народного хозяйства достаточно многогранна и также имеет тенденцию к дальнейшему расширению. Соответственно широк и многообразен диапазон дальнейших изысканий эффективного технологического применения ВиХМП. Исследования в этой области, несомненно, актуальны и перспективны. Они смогут обеспечить эффективное решение многих практических задач.

Универсальность и многоотраслевой характер применения ВиХМП для решения технологических задач перспективно в автомобилестроении и авиационной технике, тракторном и сельскохозяйственном машиностроении, судостроении и производстве бытовой техники, горнодобывающих машин и инструмента и др., т.к. это способствует повышению производительности, качественных показателей деталей и изделий и их эксплуатационных свойств, решению экологических задач предприятий.

Выводы:

-Энергетическая модель позволила описывать влияние материала покрытия и условий протекания процесса на кинетику изменения внутренней энергии локальных микрообъемов, модифицированных при формировании покрытия, получаемого в результате взаимодействия с поверхностью металла рабочей среды при активирующем ударно-импульсном воздействии гранул (металлических или неметаллических).

-На основе энергетической модели получена расчетно-аналитическая модель вибрационной технологической системы нанесения покрытий, позволяющая управлять химико-механическим синтезом процесса на стадии технологической подготовки производства, а также решить ряд оптимизационных технологических задач по обеспечению качества и эксплуатационных свойств поверхности деталей.

-Научно обоснованы и решены технические и технологические задачи нанесения ВиХМП на базе разработанной методологии, алгоритма и программы выбора методов и режимов обработки, обеспечивающих требуемые параметры качества покрытия с учетом их функционального назначения с минимальной себестоимостью. Так, для покрытий первой группы получена стоимость до 5 раз ниже аналогов, для второй группы – в 2,5 раза, для третьей – в 2,1 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев А.П. Иванов В.В., Бурлакова В.Э., Филипчук О.С. Исследование микро/нанопрофиля цинкового покрытия при вибрационной механохимической обработке углеродистых сталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. - №7. С.46-49.
2. 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.
3. Иванов В.В., Селеменев М.Ф., Марченко Ю.В. Формирование вибрационных механохимических твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 2 (286). С. 73-78.
4. 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, V. 327, 2018. doi:10.1088/1757-899X/327/3/032026. 18-22.
5. 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, V. 327, 2018. doi:10.1088/1757-899X/327/3/032025.
6. Lebedev V. A, Ivanov V.V. and Fedorov V. P. Morphological analysis of galvanized coating applied under vibrowave process system conditions // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124. 2016. doi:10.1088/1757-899X/124/1/01216.
7. Babichev, A., Ivanov V., Pogoelov. The research of technological characteristic of the vibrowave mechanical and chemical oxide coating formation. (Conference Paper) The research of technological characteristic of the vibrowave mechanical and chemical oxide coating formation. 2017; DOI: 10.1051/mateconf/201713201004
8. A.A. Ivakhnenko, M.L. Storublev, A.G. Ivakhnenko. Tolerance Synthesis When in Operation of Process Equipment for Electroplated Coating Application // Procedia Engineering. Vol.150, 2016. Pp.742-745. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.097>.
9. Valeriy Blumenstein, Maksim Mahalov, Oleg Ostanin. Simulation and Calculation of Residual Stresses in Mining Machines Components. E3S Web of Conferences 41, 03012 (2018) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184103012> IIIrd International Innovative Mining Symposium - <https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/16/contents/contents.html>.
10. V.V. Ivanov., V. P. Smolentsev, A. I. Portnykh. Technology of combined chemical-mechanical

fabrication of durable coatings. MEACS 2017 IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 042121 doi:10.1088/1757-899X/327/4/042121

11. Ivanov V. Nikolay P. Pogorelov, Mikhail F. Selmenyev, Artem A. Sakunov Research of micro and nano profile surface morphology of vibrational mechanical and chemical zinc coating. MATEC Web of Conferences .Published online: 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822601018>

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

13. Грилихес С.Я. Электролитические и химические покрытия / С.Я. Грилихес, К.И. Тихонов. Л.: Химия, 1990.

14. Иванов В.В. Вибрационные механохимические методы нанесения покрытий (цинкование) / В.В. Иванов. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2010. 8,9 п.л.

15. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Изд. 2е, перераб. и доп. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008г. – 694с.

16. Безязычный В.Ф. Основы технологии машиностроения: учеб. для вузов / В.Ф. Безязычный. М.: Машиностроение, 2013. – 568 с.

17. Витязь П.А. Твердосмазочные покрытия в машиностроении / П.А. Витязь, Ф.А. Илющенко, М.А. Андреев и др. Минск: Белорусская наука, 2007.

18. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии / Э.М. Гутман. М.: Металлургия, 1974.

19. Пат. 2528291 Российская Федерация, МПК В24В 31/02 (2006.01). Устройство для отделочно-упрочняющей обработки / Г.В. Серга, В.А. Лебедев, В.В. Иванов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет». – №2013106599/02; заявл. 14.02.2013; опубл. 10.09.2014. Бюл. №25.

20. Ivanov V.V., Popov S.I., Kirichek A.V. Qualitative Characteristics of MoS₂ Solid-Lubricant Coating Formed by Vibro-Wave Impact of Free-Moving Indenters // Key Engineering Materials, Vol. 736, pp. 18-22, 2017. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.736.18.

21. Иванов В.В., Загутин Д.С., Попов С.И., Скудина А.А. Повышение эксплуатационных характеристик и эксплуатационных свойств покрытий, сформированных в условиях вибрационного механохимического воздействия // Инженерный вестник Дона.- 2019.- № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5580.

22. Иванов В.В., Загутин Д.С., Попов С.И., Останин О.А. Анализ методов по формированию вибрационных механохимических покрытий // Вестник Кузбасского государственного технического университета.- 2018.- № 5.- С. 106-113.

23. Бабичев А.П., Иванов В.В., Попов С.И., Донцов Н.С. Особенности механизма формирования вибрационного химико-механического цинкового покрытия // Упрочняющие технологии и покрытия.- 2018.- Том 14, № 2(158).- С. 51-54.

24. Ivanov V.V., Dontsov N.S., Kirichek A.V. Mechanical Zinc Coating Procedure under Conditions of Vibration Mechanical-Chemical Impact // Key Engineering Materials, Vol. 736, pp. 105-109, 2017. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.105

Vladimir V. Ivanov ¹, Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor, Valeriy A. Lebedev ¹, Cand. tech. sciences, professor, Sergey I. Popov ¹, C. Sc. in Engineering, Associate Professor
Nikolay S. Dontsov ¹, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Oleg A. Ostanin ², Senior Lecturer.

¹Donskoy State Technical University, Rostov-on-Don, 344000, pl. Gagarin, 1, Russian Federation

²T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesenniyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF CHEMICAL-MECHANICAL VIBRATION COATINGS IN MECHANICAL ENGINEERING

Abstract: The article presents the study of vibrational chemical-mechanical coatings. The energy model of coating formation in vibration technological systems is proposed. The classification is developed depending on the energy capacity of the system (the nature and intensity of the processes occurring between the base and the coating). The advantages of vibrational chemical-mechanical coatings over traditional coating methods and the scope of their practical application are shown. Comparative trials of vibrational chemical-mechanical coatings (Vamp) sformirovannykh on this vibratory equipment and coatings obtained by conventional methods (electroplating, manual application and .a number of undeniable advantages and quality indicators of vibrational chemical-mechanical coatings are shown.

Keywords: vibration chemical-mechanical coatings, vibration technological system, energy impact, surface quality.

Article info: received February 01, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-3-12

REFERENCES

1. 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 // *Hardening technology and coatings*. 2014. - №7. P. 46-49.
2. 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. Solovyov.- 2018.- № 1 (44).- P. 108-113.
3. Ivanov V. V., Selemenov M. F., Marchenko Yu. V. forming a vibrating mechanical hard lubricant coatings based on molybdenum disulphide // *Fundamental and applied problems of technics and technology*. 2011. № 2 (286). P. 73-78.
4. 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*, V. 327, 2018. doi:10.1088/1757-899X/327/3/032026. 18-22.
5. 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*, V. 327, 2018. doi:10.1088/1757-899X/327/3/032025.
6. Lebedev V. A, Ivanov V.V. and Fedorov V. P. Morphological analysis of galvanized coating applied under vibrowave process system conditions// *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 124. 2016. doi:10.1088/1757-899H/124/1/01216.
7. Babichev, A., Ivanov V., Pogorelov. The research of technological characteristic of the vibrowave mechanical and chemical oxide coating formation.(Conference Paper)The research of technological characteristic of the vibrowave mechanical and chemical oxide coating formation. 2017; DOI: 10.1051/mateconf/201713201004
8. A.A. Ivakhnenko, M.L. Storublev, A.G. Ivakhnenko. Tolerance Synthesis When in Operation of Process Equipment for Electroplated Coating Application // *Procedia Engineering*. Vol. 150, 2016. Pp. 742-745. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.097>.
9. Valeriy Blumenstein, Maksim Mahalov, Oleg Ostanin. Simulation and Calculation of Residual Stresses in Mining Machines Components. *E3S Web of Conferences* 41, 03012 (2018) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184103012> IIIrd International InnovativeMiningSymposium-<https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/16/contents/contents.html>.
10. V.V. Ivanov., V. P. Smolentsev, A. I. Portnykh. Technology of combined chemical-mechanical fabrication of durable coatings. *MEACS 2017 IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327 (2018) 042121 doi:10.1088/1757-899X/327/4/042121
11. Ivanov V. Nikolay P. Pogorelov, Mikhail F. Selemenov, Artem A. Sakunov Research of micro and nano profile surface morphology of vibrational mechanical and chemical zinc coating. *MATEC Web of Conferences*. Published online: 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822601018>
12. V. A. Lebedev, V. V. Ivanov, V. D. Sokolov and others Energy model of formation of vibrational mechanochemical coatings. // *Nanoengineering*, 2013. №5-P. 11-17.
13. Griliches Sy Electrolytic and chemical coating / S. Y. Griliches, K. I. Tikhonov. L.: Chemistry, 1990.
14. Ivanov V. V. Vibration mechano-chemical coating methods (dip) / V. V. Ivanov. – Rostov-on-don: DGTU Publishing center, 2010. 8.9 PP.
15. Babichev A. P., Babichev, I. A., fundamentals of vibration technology. Ed. 2nd, Rev. and DOP. – Rostov n/D: Publishing center DGTU, 2008. – 694s.
16. Bezlyazychny V. F. Fundamentals of engineering technology: studies. for high schools / V. F. Bezhyazichniy. M.: Mechanical Engineering, 2013.- 568 p.
17. Vityaz P. A. firm lubricant coverings in engineering / P. A. Vityaz', A. F. Ilyushchenko, M. A. Andreev et al., Minsk: BelorusskayaNauka, 2007.
18. E. M. Gutman, Mechanochemistry of metals and corrosion protection / E. M. Gutman. M.: Metallurgy, 1974.
19. Pat. 2528291 Russian Federation, IPC B24V 31/02 (2006.01). Device for finishing and strengthening processing / G. V. Serga, V. A. Lebedev, V. V. Ivanov; applicant and patent holder of fsbei HPE "Kuban state agrarian University". No 2013106599/02; Appl. 14.02.2013; publ. 10.09.2014. Bul. No. 25.
20. Ivanov V.V., Popov S.I., Kirichek A.V. Qualitative Characteristics of MoS2 Solid-Lubricant Coating Formed by Vibro-Wave Impact of Free-Moving Indenters // *Key Engineering Materials*, Vol. 736, pp. 18-22, 2017. DOI:10.4028/ www.scientific.net/ KEM.736.18.
21. Ivanov V.V., Zagutin D.S., Popov S.I., Skudina A.A. Povyshenie ekspluatatsionnykh harakteristik i ekspluatatsionnykh svoystv pokrytij, sformirovannykh v usloviyah vibratsionnogo mekhanohimicheskogo vozdejstviya // *Inzhenernyj vestnik Dona*. - 2019.- № 1. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5580.
22. Ivanov V.V., Zagutin D.S., Popov S.I., Ostanin O.A. Analiz metodov po formirovaniyu vibratsionnykh mekhanohimicheskikh pokrytij // *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. - 2018.- № 5.- S. 106-113.

23. Babichev A.P., Ivanov V.V., Popov S.I., Dontsov N.S. Osobennosti mekhanizma formirovaniya vibracionnogo himiko-mekhanicheskogo cinkovogo pokrytiya // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. - 2018. - Tom 14, № 2(158). - S. 51-54.

Библиографическое описание статьи

Иванов В.В., Лебедев В.А., Попов С.И., Донцов Н.С., Останин О.А. Анализ применения химико-механических вибрационных покрытий в машиностроении // Горное оборудование и электромеханика — 2019. — № 1 (141). — С. 3-12.

24. Ivanov V.V., Dontsov N.S., Kirichek A.V. Mechanical Zinc Coating Procedure under Conditions of Vibration Mechanical-Chemical Impact // Key Engineering Materials, Vol. 736, pp. 105-109, 2017. DOI: 10.4028/ www.scientific.net/ KEM.736.105

Reference to article

Ivanov V.V., Lebedev V.A., Popov S.I., Dontsov N.S., Ostanin O.A. Analysis of the application of chemical-mechanical vibration coatings in mechanical engineering. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 1 (141), pp. 3-12.