

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-3-3-48-59](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-3-3-48-59)



УДК 621.793

UDC 621.793

2.5.6 – технология машиностроения

ИССЛЕДОВАНИЯ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ВИБРАЦИОННЫХ МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ДЕТАЛЕЙ

STUDIES OF THE ADHESIVE STRENGTH OF VIBRATIONAL MECHANOCHEMICAL COATINGS AND THEIR EFFECT ON THE CORROSION RESISTANCE OF PARTS

✉¹ **Лебедев Валерий Александрович**, к.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты», Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: va,ledidev@yandex.ru

✉¹ **Lebedev Valery Alexandrovich**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Metal-cutting Machines and Tools", Don State Technical University, Rostov-on-Don, e-mail: va,ledidev@yandex.ru

Штын Сергей Юрьевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: sshtyn@bk.ru

Shtyn Sergey Yurievich, postgraduate students of the Department of "Mechanical Engineering Technologies", Don State Technical University, Rostov-on-Don, e-mail: sshtyn@bk.ru

Кукаркин Илья Дмитриевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: ilya.kukarkin@yandex.ru

Kukarkin Ilya Dmitrievich, postgraduate students of the Department of "Mechanical Engineering Technologies", Don State Technical University, Rostov-on-Don, e-mail: ilya.kukarkin@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований адгезионной прочности вибрационных механохимических покрытий и их влияние на коррозионную стойкость деталей. Установлена связь коррозионной стойкости, оцениваемой показателем проницаемости, с адгезионной прочностью покрытия и предложена эмпирическая зависимость, позволяющая на этапе технологической подготовки производства оценить эксплуатационные характеристики изделия.

Annotation. The results of experimental studies of the adhesive strength of vibrational mechanochemical coatings and their effect on the corrosion resistance of parts are presented. The relationship between the corrosion resistance of the estimated permeability index and the adhesive strength of the coating is established and an empirical dependence is proposed that allows evaluating the operational characteristics of the product at the stage of technological preparation of production.

Ключевые слова: ВИБРАЦИОННОЕ МЕХАНОХИМИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ, АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ, КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ.

Keywords: VIBRATION MECHANOCHEMICAL COATING, ADHESIVE STRENGTH, CORROSION RESISTANCE.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Отличительной особенностью вибрационных механохимических покрытий (ВиМХП) от других способов нанесения покрытий является то, что их формирование происходит в условиях вибрационного ударноимпульсного воздействия инденторов. В результате динамического воздействия обеспечивается активация химических процессов, протекающих в поверхностном слое, происходит изменение его геометрических и физико-механических характеристик. Основными факторами, определяющими механизм формирования покрытия на поверхности металлов, являются: природа контактирующих материалов и их физико-химические свойства; степень участия металлической основы в образовании покрытия; условия формирования покрытий, обусловленные амплитудно-частотными параметрами виброволнового воздействия, видом и гранулометрическими характеристиками инденторов, уровнем создаваемых в зоне контакта динамических нагрузок [1-8].

Процесс формирования вибрационных механохимических покрытий является термодинамическим, представляющим собой совокупность одновременно протекающих в поверхностном слое металла явлений под воздействием механических внешних сил, а также химических и физико-химических явлений [1,9-13]. Результатом химических и физико-химических превращений в зоне взаимодействия компонентов соединения под влиянием механических воздействий является адгезия, основными характеристиками которой являются: энергия адгезии, прочность сцепления и сила адгезии [9,12,13,15,16,19]. Учитывая, что прочность соединения покрытия с подложкой является следствием адгезии, в качестве фундаментальной энергетической характеристики U_0 , определяющей прочность формируемого на поверхности металла покрытия, предложена средняя энергия единицы связи E_A , которая обеспечивает адгезию локального микрообъёма покрытия, модифицированного путём механохимического синтеза, на границе раздела контактирующих сред. Установление связи эксплуатационных свойств с прочностью покрытий, сформированных в вибрационных механохимических воздействиях, является одним из целевых предназначений настоящего исследования

2 Материалы и методы

Для экспериментальных исследований был выбран процесс нанесения цинкового покрытия, которое решает одну из важнейших эксплуатационных задач повышения коррозионной стойкости поверхностей деталей. Для оценки коррозионной стойкости поверхностных слоёв, модифицированных в процессе нанесения ВиМХП, предложен параметр проницаемости P_E в виде:

$$P_E = 8,76 (\Delta m) / (K_E \cdot \rho_d), \text{ мм}$$

где Δm – потери массы детали, отнесенные к площади поверхности, г/м²; K_E – коэффициент влияния адгезии на изменение плотности модифицированной поверхности; ρ_d – плотность материала детали, кг/м³.

Покрытие наносилось на цилиндрические образцы, изготовленные из материала Ст25, Ст35 и Ст45 диаметром 10 мм, толщиной 5 мм и с шероховатостью поверхности Ra 1,25 мкм в цилиндрической рабочей камере объёмом 0,5 л, которая устанавливалась на виброплатформе опытно-экспериментальной вибрационной установки УВГ 4х10. В качестве технологической среды покрытия использована цинковая суспензия, состоящая из воды, порошка Zn марки ПЦ-2 (ГОСТ – 3640-79), содержащего в %: Zn- 99,95; Pb-0,036; Cd-0,01; Sn-0,004 и порошка хлористого цинка ZnCl₂. Приготовление цинковой суспензии предусматривало растворение в 1 литре воды 50-150 гр. порошка хлористого цинка ZnCl₂ и 50-250 гр. порошка Zn марки ПЦ-2, при этом вязкость получаемого раствора должна быть в пределах $\geq 8,94 \cdot 10^{-4}$ Па·с. Для активации процесса формирования покрытия поверхности

металлических образцов использовались инденторы в виде металлических шариков диаметром 2-6 мм и фарфоровых шариков диаметром 6-9 мм. Время обработки варьировалось от 20 до 40 мин.

Исследование адгезионной прочности вибрационного механохимического покрытия проводилось на оборудовании наноцентра ДГТУ: установка Nanotest 600, сканирующий зондовый микроскоп «Nanoeducator». Прочность адгезии при использовании метода наноиндентирования [14] рассчитывалась по зависимости, связывающей ее с критической латеральной нагрузкой F_l^c начала отрыва пленки от подложки следующим образом:

$$G = \frac{(F_l^c)^2 \delta}{\pi r_c^4 E_f}, \text{ Дж/моль} \quad (19)$$

где r_c – радиус пятна контакта в момент начала отслаивания покрытия, мм; δ – толщина покрытия, мм; E_f – модуль Юнга покрытия, Па.

Для определения толщины нанесенного покрытия использовался толщиномер ТМ-3 с диапазоном измеряемых толщин от 0 до 100 мкм, точность измерений прибора равна 3 % от фактических показаний. Оценка размера радиуса пятна контакта индентора с образцом в момент начала отслаивания покрытия осуществлялись на металлографическом микроскопе, оснащенный тринокулярной визуальной насадкой с видимым увеличением от 40 до 400 раз.

Испытания на коррозионную стойкость проводились на стенде СИС-46. Для определения массы образцов при исследовании коррозионной стойкости использовались аналитические весы SHINKO AF с разрешением до 0,01 мг.

3 Результаты исследований

Первоочередной задачей экспериментальных исследований по оценке влияния механической активации на процесс формирования покрытия и его адгезионную прочность являлось обоснование условий, обеспечивающих её эффективное проявление. В ранее проведенных экспериментах в НИИ «Вибротехнологии» ДГТУ, установлено, что технологический эффект вибрационной отделочно-упрочняющей обработки наблюдается при величине пороговой амплитуды колебаний рабочей камеры $A_0 = 1$ мм и частоте колебаний рабочей камеры $f_0 = 10-15$ Гц [10,11]. С целью обоснования приемлемости этих пороговых значений амплитуды и частоты колебаний рабочей камеры для оценки эффективности влияния механической активации на процесс формирования вибрационных механохимических покрытия была проведена серия экспериментальных исследований, результаты которых приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты исследований по установлению пороговой частоты колебаний рабочей камеры, обеспечивающей эффективное влияние механической активации на процесс формирования ВиМХЦП

| Технолог. регламенты | Показатели | Частота колебаний рабочей камеры, Гц | | | |
|--|---------------------------------------|--------------------------------------|------------|-----------|-----------|
| | | 15 | 25 | 33 | 45 |
| Образец из стали 35, амплитуда – 2,5 мм; индентор – стальные шары 6 мм | Диапазон изменения, $G_{\text{эксп}}$ | 60,3-66,8 | 61,93-68,2 | 64,8-70,0 | 65,8-71,0 |
| | $G_{\text{эксп. ср}}$ | 63,4 | 64,8 | 67,0 | 67,8 |
| | $G_{\text{расч.}}$ | 69,0 | 70,7 | 72,8 | 73,7 |
| | Погрешность, % | 8,6 | 8,9 | 8,5 | 8,6 |

Таблица 2 – Результаты исследований по установлению пороговой амплитуды колебаний рабочей камеры, обеспечивающей эффективное влияние механической активации на процесс формирования ВиМХЦП

| Технолог. регламенты | Показатели | Амплитуда колебаний рабочей камеры, мм | | | |
|---|---------------------------------------|--|-----------|-----------|----------|
| | | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| Образец из стали 35, частота – 33 Гц; индентор – стальные шары 6 мм | Диапазон изменения, $G_{\text{эксп}}$ | 65,8-65,9 | 66,0-66,3 | 66,5-67,2 | 67- 68,2 |
| | $G_{\text{эксп. ср}}$ | 65,85 | 66,15 | 66,85 | 67,7 |
| | $G_{\text{расч.}}$ | 69,76 | 70,2 | 71,75 | 72,5 |
| | Погрешность, % | 5,9 | 6,1 | 7,3 | 7,0 |

Результаты исследований влияния уровня механической активации процесса на адгезионную прочность покрытия приведены в табл. 3 и табл. 4, а характерная для них закономерность показана на рис. 1.

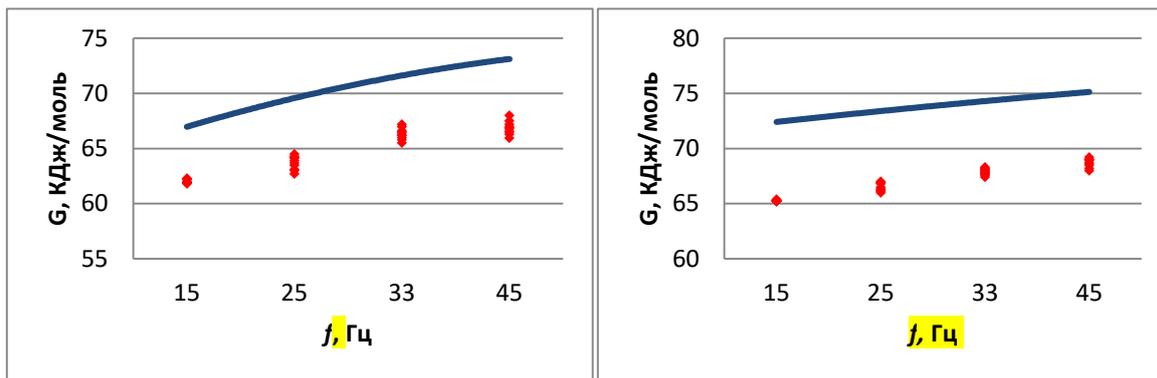
На рис. 2 построена диаграмма накопления внутренней энергии в локальном микрообъёме модифицированного в процессе механохимического синтеза поверхностного слоя покрытия при его нанесении в вибрационной технологической системе, определяющей его адгезионную прочность в зависимости от изменения энергетического состояния инденторов рабочей среды, активирующей процесс формирования покрытия.

Таблица 3 – Экспериментальные и расчетные значения адгезионной прочности G для ВиМХЦП, Дж/моль, полученные на образцах из стали 35 в результате ударно-импульсного воздействия фарфоровых инденторов диаметром 6 мм на различных частотах колебаний рабочей камеры

| Технолог. регламенты | Показатели | Частота колебаний рабочей камеры, Гц | | | |
|---|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------|-----------|----------|
| | | 15 | 25 | 33 | 45 |
| Образец из стали 35, амплитуда – 2,5 мм; инденторы – фарфоровые шары диаметром 6-9 мм | Диапазон изменения, $G_{\text{эксп}}$ | 61,8-62,3 | 62,7-64,5 | 65,5-67,2 | 65,95-68 |
| | $G_{\text{эксп. ср}}$ | 62,05 | 63,7 | 66,34 | 66,87 |
| | $G_{\text{расч.}}$ | 67,2 | 68,9 | 72,3 | 72,9 |
| | Погрешность, % | 8,2 | 8,1 | 8,9 | 9,0 |

Таблица 4 – Экспериментальные и расчетные значения адгезионной прочности G для ВиМХЦП, Дж/моль, полученные на образцах из стали 35 в результате ударно-импульсного воздействия стальных инденторов диаметром 6 мм на различных частотах колебаний рабочей камеры

| Технолог. регламенты | Показатели | Частота колебаний рабочей камеры, Гц | | | |
|---|---------------------------------------|--------------------------------------|-------|-----------|-----------|
| | | 15 | 25 | 33 | 45 |
| Образец из стали 35, амплитуда – 2 мм; инденторы – стальные шары 2-6 мм | Диапазон изменения, $G_{\text{эксп}}$ | 65,2-65,4 | 66-67 | 67,4-68,3 | 68,2-69,2 |
| | $G_{\text{эксп. ср}}$ | 65,3 | 66,5 | 67,87 | 68,7 |
| | $G_{\text{расч.}}$ | 72,35 | 73,6 | 74,1 | 75,2 |
| | Погрешность, % | 10,7 | 10,6 | 9,1 | 9,4 |



а)

б)

$A = 2,5$ мм, $t = 40$ мин, концентрация технологической среды 50 г/л порошка Zn ПЦ-2 ГОСТ 360-79:
 а) фарфоровые шары диаметром Ø6-9 мм; б) стальные шары диаметром Ø2-6 мм

Рисунок 1 – Зависимость адгезионной прочности покрытия Ст35-Zn от частоты колебания рабочей камеры

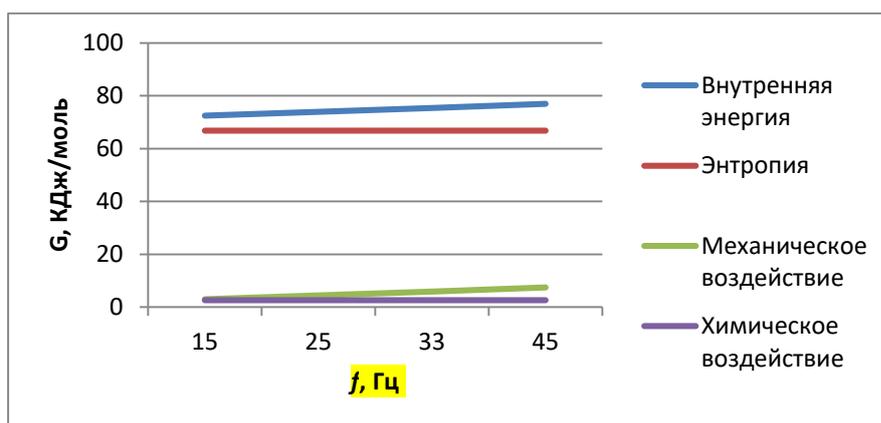


Рисунок 2 – Диаграмма накопления внутренней энергии в локальном микрообъёме ВиМХЦП при изменении энергетического состояния инденторов и рабочей среды, активирующей процесс формирования покрытия

Для установления влияния химической активности технологической среды покрытия на формирование ВиМХЦП и его адгезионную прочность важно было обосновать условия проведения экспериментальных исследований, позволяющих в рамках однофакторного эксперимента оценить адекватность аналитической зависимости, пригодной для её описания. Для этого время вибрационной механохимической обработки, обуславливающее величину энергии за счёт роста энтропии, было выбрано постоянным, а значения амплитудно-частотных характеристик колебаний рабочей камеры – на уровне пороговых. Изменяя концентрацию структурных составляющих цинкового раствора и, как следствие, его химическую активность экспериментально изменялась адгезионная прочность покрытия в соответствии с расчётной оценкой согласно [15]. Результаты исследований влияния химической активности цинкового раствора на адгезионную прочность покрытия, сформированного в вибрационной технологической системе представлены в табл. 5 и на рис. 3.

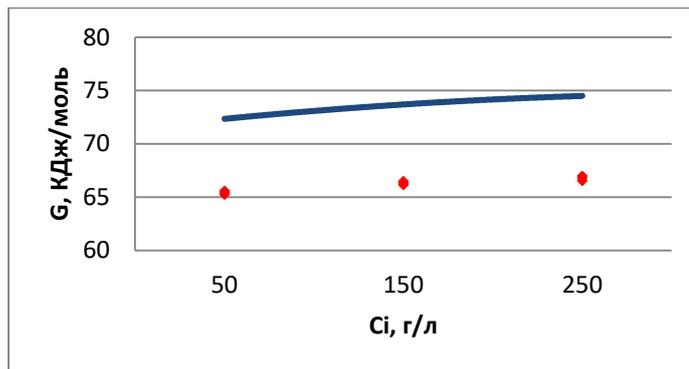


Рисунок 3 – Зависимость адгезионной прочности цинкового ВиМХЦП от концентрации цинкового раствора для образцов из стали Ст35; $A = 2,5$ мм, $f = 25$ Гц; $t = 40$ мин, инденторы – стальные шары диаметром $\varnothing 2-6$ мм

Таблица 5 – Экспериментальные и расчетные значения адгезионной прочности G для ВиМХЦП, Дж/моль, полученные на образцах из стали 35 в результате ударно-импульсного воздействия фарфоровых инденторов диаметром 6 мм при частоте колебаний рабочей камеры $f = 15$ Гц, амплитуде $A = 2,5$ мм, времени обработки $t = 40$ мин и применении различной по составу технологической среды покрытия

| Технологические регламенты | Показатели | Состав технологической среды покрытия | | |
|---|---------------------------------------|---|--|--|
| | | Вода - 1л; порошок Zn марки ПЦ2 - 100 г/л; порошок ZnCl ₂ - 50 г/л | Вода - 1л; порошок Zn марки ПЦ2 - 100 г/л; порошок ZnCl ₂ - 150 г/л | Вода - 1л; порошок Zn марки ПЦ2 - 100 г/л; порошок ZnCl ₂ - 250 г/л |
| Образец из стали 35, инденторы - фарфоровые шары диаметром 6-9 мм | Диапазон изменения, $G_{\text{эксп}}$ | 65,2-65,6 | 66,1-66,5 | 66,5-67 |
| | $G_{\text{эксп. ср}}$ | 65,45 | 66,34 | 66,81 |
| | $G_{\text{расч.}}$ | 72,35 | 73,7 | 74,5 |
| | Погрешность, % | 10,5 | 11,0 | 11,5 |

На рис. 4 по результатам проведенных исследований построена диаграмма накопления внутренней энергии в локальном микрообъеме поверхностного слоя, модифицированного в процессе механохимического синтеза нанесения покрытия в вибрационной технологической системе, определяющей его адгезионную прочность в зависимости от изменения химической активности технологической среды покрытия.

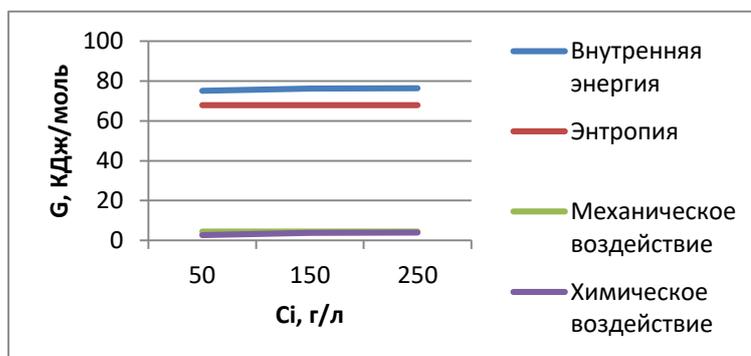


Рисунок 4 – Диаграмма накопления внутренней энергии в локальном микрообъеме ВиМХЦП при изменения химической активности технологической среды покрытия

В работах [12,13,15,20,21] показано, что одну и ту же адгезионную прочность покрытия можно обеспечить в результате варьирования энергетического вклада в процесс формирования покрытия химического взаимодействия технологической среды покрытия с металлом и механического воздействия инденторов на поверхность, подвергаемую нанесению покрытия.

С целью обоснования возможности управления механохимическим синтезом в процессе нанесения покрытий путем регулирования механических и химических параметров, проведено сравнение технологических регламентов нанесения ВиМХЦП, обеспечивающих достижение одинаковых по величине значений адгезии, приведённых в табл. 6.

Таблица 6 – Примеры технологических регламентов, обеспечивающих достижение одинаковых по величине значений адгезионной прочности G для ВиМХЦП, Дж/моль, на образцах из стали 35

| Технологический регламент | Вклад технологических факторов в энергетическое состояние ВиМХЦП, Дж/моль | | | Адгезионная прочность ВиМХЦП, Дж/моль | | Погрешность, % |
|---|---|--------------------|------------------------|---------------------------------------|--------------------|----------------|
| | Тепловой эффект | Химическая реакция | Механическая активация | $G_{\text{эксп. ср}}$ | $G_{\text{расч.}}$ | |
| Образец из стали 35, амплитуда – 2,5 мм; инденторы – фарфоровые шары диаметром 9 мм, управление изменением частоты f | 60,48 | 2,69 | 9,13 | 66,34 | 72,3 | 8,9 |
| Образец из стали 35, амплитуда – 2,5 мм; индентор – стальные шары диаметром 2-6 мм, управление изменением амплитуды A | 65,12 | 2,89 | 4,34 | 65,3 | 72,35 | 10,7 |
| Образец из стали 35, инденторы – фарфоровые шары диаметром 9 мм, управление концентрацией $ZnCl_2$ | 65,84 | 2,17 | 4,34 | 65,45 | 72,35 | 10,5 |

С целью установления зависимости коррозионной стойкости опытных образцов от адгезионной прочности получаемого покрытия, для ряда покрытий полученных при проведении вышеизложенных исследований экспериментальных исследований по установленным регламентам (табл. 7) были определены расчетные значения параметра проницаемости покрытия $P_{\text{ЕЛОК}}$ и коэффициента влияния адгезии на изменение плотности модифицированного поверхностного слоя K_E , которые представлены в табл. 8.

Таблица 7 – Технологические регламенты получения ВиМХЦП

| № технологического регламента | Материал образцов | Материал инденторов | Технологическая среда | | частота f , Гц | Амплитуда A , мм | Время t , мин |
|-------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| | | | порошок Zn ПЦ-2 ГОСТ 360-79, г/л | водный раствор $ZnCl_2$, г/л | | | |
| 1 | Ст45 | фарфор | 100 | 150 | 15 | 2,5 | 40 |
| 2 | Ст35 | фарфор | 50 | 100 | 33 | 2,5 | 40 |
| 3 | Ст45 | фарфор | 100 | 250 | 15 | 2,5 | 40 |
| 4 | Ст25 | фарфор | 100 | 250 | 15 | 2,5 | 40 |
| 5 | Ст35 | сталь | 50 | 100 | 45 | 2,5 | 40 |
| 6 | Ст45 | сталь | 50 | 100 | 45 | 2,5 | 40 |

Таблица 8 – Экспериментальные значения параметра проницаемости и коэффициента влияния адгезии на изменение плотности поверхностного слоя образцов модифицированной в процессе нанесения ВиМХЦП

| Технологический регламент | $G_{\text{эксп. ср.}}$ Дж/моль | Параметр проницаемости, мм/год | | K_E |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------|
| | | $P_{\text{Еисх}}$ | $P_{\text{Епок}}$ | |
| 1 | 63,8 | 0,00419 | 0,00032 | 13,09 |
| 2 | 66 | | 0,00018 | 23,28 |
| 3 | 66,5 | | 0,00014 | 29,93 |
| 4 | 67,1 | | 0,00012 | 34,92 |
| 5 | 67,9 | | 0,00011 | 38,09 |
| 6 | 68,7 | | 0,0001 | 41,90 |

4 Обсуждение и заключение

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил установить следующее:

– изменение частоты колебаний рабочей камеры в диапазоне от 15 Гц до 45 Гц, приводит к увеличению вклада механической активации в энергетическое состояние формируемого цинкового покрытия на поверхности образцов из стали 25, 35 и 45 и, как следствие, к росту его адгезионной прочности. Это подтверждает экспериментально установленный в многочисленных работах факт, что при увеличении уровня механического воздействия инденторов на обрабатываемую поверхность повышается плотность дефектов структуры материала в поверхностном слое, его внутренняя энергия и энергия взаимодействия частиц материала детали и наносимого покрытия;

– применяемые для проведения экспериментальных исследований материалы, существенного влияния на повышение механической активации процесса формирования цинкового покрытия и его адгезионную прочность не оказали, в связи с незначительными отличиями по физико-механическим свойствам. Вместе с тем, результаты теоретических исследований, получившие отражение в аналитической модели технологической системы вибрационной механохимической обработки [12,13,20] предполагают, что с ростом твёрдости материала, подвергаемого покрытию, механическая активация процесса будет снижаться;

– применение в качестве гранулированной среды инденторов из стали ШХ15 позволяет повысить механическую активацию процесса формирования и обеспечить в среднем прирост адгезионной прочности от 0,5% до 3% по отношению к обработке с фарфоровыми шарами. Это объясняется тем, что при воздействии стальными шарами уровень механической активации поверхности детали выше за счет большей массы стальных инденторов;

– расхождение экспериментальных и расчётных значений адгезионной прочности находится в пределах экспериментальной ошибки (4,8-16 %), что свидетельствует о том, что разработанные для определения адгезионной прочности энергетические модели учитывают входящие в них параметры процесса с постоянной величиной, без учета их возможной нестабильности в реальном процессе, такие как твердость, модуль упругости и другие.

Из представленной на рис. 2 диаграммы следует, что вклад механической активации в изменение энергетического состояния локального объёма цинкового покрытия, сформированного в вибрационной технологической системе, в пределах продолжительности обработки, установленной планом экспериментальных исследований, составляет 9,78 % от общей величины адгезионной прочности ВиМХЦП.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что при увеличении концентрации раствора $ZnCl_2$ в составе технологической среды покрытия приводит к росту числа химически активных частиц и, как следствие, к числу химических связей с обрабатываемой поверхностью образцов, обуславливающих повышение адгезионной прочности покрытия.

Сравнительный анализ результатов исследований показал, что экспериментальные значения адгезионной прочности превышают расчетные значения. Это свидетельствует о том, что используемая модель [12,13,20] для расчета энергии, обусловленной химическим взаимодействием контактирующих сред, не учитывает дополнительные факторы, оказывающие влияние на химическое взаимодействие компонентов технологической среды с поверхностью детали. Вместе с тем, близость величин в пределах 4,8-11,5 % подтверждает целесообразность её использования для оценки адгезионной прочности наносимого покрытия.

Из представленной на рис. 4 диаграммы следует, что вклад химического взаимодействия контактирующих сред в изменение энергетического состояния локального объёма цинкового покрытия, сформированного в вибрационной технологической системе в пределах продолжительности обработки, установленной планом экспериментальных исследований, составляет 5 % от общей величины адгезионной прочности ВиМХЦП.

При анализе изменения адгезионной прочности между образцами из разных марок стали выявлено незначительная их разница при увеличении концентрации технологической среды, что говорит примерно об одинаковом химическом составе используемых марок стали. Также установлено, что при увеличении концентрации раствора $ZnCl_2$ на 200 % адгезионная прочность увеличивается не более, чем в 1,01 раза.

Проведённые исследования позволяют с достаточной для практики точностью проектировать технологические регламенты путем регулирования механическими и химическими параметрами процесса, обеспечивая при этом требуемую по условиям эксплуатации величину адгезионной прочности и наиболее предпочтительные с экологической точки зрения условия формирования покрытия. Кроме того, установлено, что технологическая эффективность процесса нанесения покрытия при управлении механическими параметрами на 2-3 % выше по сравнению с регулированием процесса химическими параметрами.

Коррозионная стойкость, оцениваемая параметром проницаемости, покрытых образцов растет вместе с увеличением их адгезионной прочности. Данный факт объясняется тем, что при увеличении энергетической связи покрытия с материалом подложки, корродирующим веществам необходимо произвести большую работу по разрушению этой связи. На основе полученных экспериментальных данных были построены графики зависимости коэффициента влияния адгезии на изменение плотности поверхностного слоя K_E модифицированного в процессе нанесения ВиМХЦП (рис. 5).

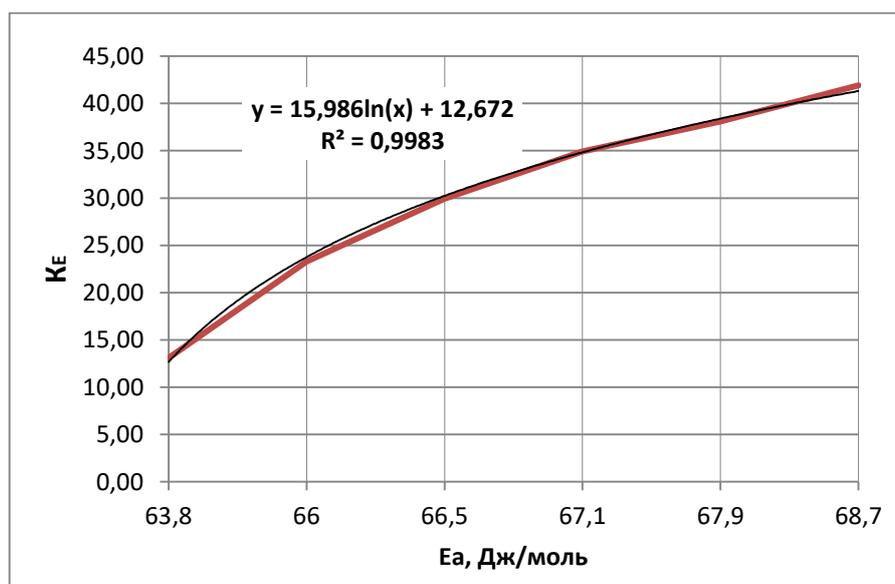


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента K_E от адгезионной прочности ВиМХЦП, нанесенных на поверхность образцов

Аппроксимация кривой, представленной на рис. 5, позволила описать ее логарифмической функцией, имеющей наиболее высокий коэффициент детерминации R^2 . Так, для образцов из марки стали Ст35 коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,9983$ (рис. 5).

В общем виде эмпирическая формула для оценки коэффициента влияния адгезии на изменение плотности поверхностного слоя K_E модифицированного в процессе нанесения ВиМХЦП на образцы из конструкционных марок стали, задействованных в опытах, имеет вид

$$K_E = 15,434 \cdot \ln(E_a) + 12,206,$$

где E_a – адгезионная прочность покрытия, Дж/моль.

Проведенные исследования показали, что для образцов из конструкционной стали при выбранных условиях нанесения покрытия, коррозионная стойкость увеличивается на величину от 9,8 до 46,6 раз по отношению к непокрытым образцам. Данный факт подтверждает высокие защитные антикоррозионные свойства вибрационных механохимических цинковых покрытий.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ, грант № 16-38-00276.

Список литературы

1 Бабичев А.П. Вибрационная механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей машин / А.П. Бабичев, В.В. Иванов, С.Н. Шудалей и др. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2012. – С.204.

2 Болдырев В.В. Исследования по механохимии твердых веществ / В.В. Болдырев // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 2009. – С. 34-40.

3 Бабичев А.П. Физико-технологические основы методов обработки: учеб. пособие / А.П. Бабичев, М.А. Тамаркин, В.А. Лебедев и др.; под ред. А.П.Бабичева. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 430 с.

4 Иванов В.В. Вибрационные механохимические методы нанесения покрытий. (цинкование). Издательский центр ДГТУ. Ростов н/Д, 2010.

5 Журавлева Л.А. Технология формирования цинкового покрытия на деталях из углеродистых сталей в условиях вибрационной обработки / Л.А. Журавлева, П.В. Колодяжный // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение, 2009. №3– С.24-28.

6 Штынь С.Ю. Особенности протекания в поверхностном слое механохимических процессов нанесения покрытий в условиях виброволновых воздействий / Штынь С.Ю., В.В. Иванов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. – №8, Ч. 2.

7 Лысенко Л.А. Особенности нанесения цинкового покрытия механохимическим методом / Л.А. Лысенко, Л.Г. Колодяжная, Л.М. Лубенская // Вибрации в технике и технологиях. Винница, 2008, №3 (52). – С.3639.

8 Анкудимов Ю.П. Повышение антикоррозионных свойств деталей из спеченных материалов нанесением покрытий из металлических порошков методом вибрационной обработки / Ю.П. Анкудимов, П.Ю. Анкудимов, М.М. Чаава // Упрочняющие технологии и покрытия. М., 2009.

9 Лебедев, В.А. Энергетическое условие формирования вибрационных механохимических покрытий и оценка их адгезионной прочности / В.А. Лебедев, С.Ю. Штынь, В.В. Иванов, И.В. Давыдова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – №8

10 Лебедев, В.А. Исследования энергетического состояния поверхностного слоя, упрочненного методами ППД / В.А. Лебедев, С.Ю. Штынь, В.Д. Соколов, М.А. Ягмуров // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – №9

11 Бутенко В.И. Локальная отделочно-упрочняющая обработка поверхностей деталей машин. Таганрог: ТРТУ, 2006. – 126 с.

- 12 Лебедев, В.А. Получение покрытий в виброволновых технологических системах на основе энергетической модели управления механохимическим синтезом процесса / В.А. Лебедев, С. Ю. Штынь, В.В. Иванов, С.В. Капустянский // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2017. – № 2, ч. 4.2.
- 13 Штынь С.Ю. Управление механохимическим синтезом процесса нанесения вибрационных механохимических покрытий на основе энергетической модели / С.Ю. Штынь, В. Д. Соколов // Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей; виброволновые технологии: сб. тр. по материалам международного симпозиума технологов-машиностроителей, г. Ростов-на-Дону, 3-7 окт. 2017 г. / ДГТУ, 2017.
- 14 Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикроробъемках, тонких приповерхностных слоях и пленках/ Ю.И. Головин// Физика твердого тела, 2008, том 50, вып. 12-с. 2113-2145-с. 2113-2145
- 15 Штынь С.Ю. Энергетическое условие формирования вибрационных механохимических покрытий и оценка их адгезионной прочности / С.Ю. Штынь // Проблемы и перспективы развития машиностроения: сб. науч. тр. междунар. на-уч.-техн. конф., посвящ. 60-летию Липецк. гос. техн. ун-та, Липецк, 10-11 нояб. 2016 г. / ЛГТУ
- 16 Витковский И.В. Теоретическое определение адгезионных свойств материалов для жидкометаллического бланкета термоядерного реактора / И.В. Витковский, А.Н. Конев, В.С. Шоркин // Журнал технической физики. – 2009. Т. 79. Вып. 2.
- 17 Иванов В.В. Исследование микро/нанопрофиля цинкового покрытия при вибрационной механохимической обработке углеродистых сталей / В.В. Иванов, А.П. Бабичев, В.Э. Бурлокова и др.// Упрочняющие технологии и покрытия, 2014, №7. – С.46-49.
- 18 Кадырметов А.М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров. Воронеж: Ипц «Научная книга». 2013. -260 с.
- 19 Киселев В.А. Цинкование крепежных деталей / Киселев В.А., Н.Н. Сорокин // Защита металлов, 1987. Т. 23, № 2. – С.287-289.
- 20 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.
- 21 Лысенко Л.А. Исследование механизма формирования цинкового покрытия на деталях углеродистых сталей в условиях вибрационной обработки / Л.А. Лысенко, Л.Г. Колодяжная // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. Луганск: Изд-во ВНУ им. В Даля, 2008. – С.209-215.

References

- 1 Babichev A.P. Vibration mechanochemistry in the processes of finishing and strengthening processing and coating of machine parts / A.P. Babichev, V.V. Ivanov, S.N. Shudaley and others. Rostov n/d: Publishing center of DSTU, 2012. – P.204.
- 2 Boldyrev V.V. Research on mechanochemistry of solid substances / V.V. Boldyrev // Journal of the All-Union Chemical Society named after. DI. Mendeleev. 2009. – pp. 34-40.
- 3 Babichev A.P. Physical and technological foundations of processing methods: textbook. allowance / A.P. Babichev, M.A. Tamarkin, V.A. Lebedev et al.; edited by A.P. Babicheva. Rostov n/d: Publishing center of DSTU, 2003. – 430 p.
- 4 Ivanov V.V. Vibration mechanochemical methods of coating. (galvanizing). Publishing center of DSTU. Rostov n/d, 2010.
- 5 Zhuravleva L.A. Technology of forming a zinc coating on parts made of carbon steels under vibration processing conditions / L.A. Zhuravleva, P.V. Kolodyazhny // Strengthening technologies and coatings. – M.: Mashinostroenie, 2009. No. 3– P.24-28.
- 6 Shtyn S. Yu. Features of the occurrence of mechanochemical coating processes in the surface layer under conditions of vibration wave influences / Shtyn S. Yu., V.V. Ivanov // News of Tula State University. Technical science. 2016. – No. 8, Part 2.

7 Lysenko L.A. Features of applying zinc coating using the mechanochemical method / L.A. Lysenko, L.G. Kolodyazhnaya, L.M. Lubenskaya // *Vibrations in engineering and technology*. Vinnytsa, 2008, No. 3 (52). – P.3639.

8 Ankudimov Yu.P. Increasing the anti-corrosion properties of parts made of sintered materials by applying coatings of metal powders using vibration treatment / Yu.P. Ankudimov, P.Yu. Ankudimov, M.M. Chaava // *Hardening technologies and coatings*. M., 2009.

9 Lebedev, V.A. Energy condition for the formation of vibration mechanochemical coatings and assessment of their adhesive strength / V.A. Lebedev, S.Yu. Shtyn, V.V. Ivanov, I.V. Davydova // *Strengthening technologies and coatings*. – 2015. – No. 8

10 Lebedev, V.A. Research of the energy state of the surface layer strengthened by SPD methods / V.A. Lebedev, S.Yu. Shtyn, V.D. Sokolov, M.A. Yagmurov // *Strengthening technologies and coatings*. – 2015. – No. 9

11 Butenko V.I. Local finishing and hardening treatment of machine parts surfaces. Taganrog: TRTU, 2006. -126 p.

12 Lebedev, V.A. Obtaining coatings in vibration-wave technological systems based on the energy model for controlling the mechanochemical synthesis of the process / V.A. Lebedev, S. Yu. Shtyn, V.V. Ivanov, S.V. Kapustyansky // *Bulletin of RSATU named after P.A. Solovyova*. – 2017. – No. 2, part 4.2.

13 Shtyn S.Yu. Control of mechanochemical synthesis of the process of applying vibration mechanochemical coatings based on the energy model / S.Yu. Shtyn, V.D. Sokolov // *Prospective directions for the development of finishing methods for processing parts; Vibrowave technologies: collection of articles. tr. based on materials from the international symposium of mechanical engineering technologists, Rostov-on-Don, October 3-7. 2017 / DSTU, 2017.*

14 Golovin Yu.I. Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin surface layers and films / Yu.I. Golovin // *Solid State Physics*, 2008, volume 50, issue. 12-s. 2113-2145-s. 2113-2145

15 Shtyn S.Yu. Energy condition for the formation of vibration mechanochemical coatings and assessment of their adhesive strength / S.Yu. Shtyn // *Problems and prospects for the development of mechanical engineering: collection of articles. scientific tr. international na-uch.-techn. conf., dedicated 60th anniversary of Lipetsk. state tech. University, Lipetsk, November 10-11. 2016 / Leningrad State Technical University*

16 Vitkovsky I.V. Theoretical determination of the adhesion properties of materials for the liquid metal blanket of a thermonuclear reactor / I.V. Vitkovsky, A.N. Konev, V.S. Shorkin // *Journal of Technical Physics*. – 2009. T. 79. Issue. 2.

17 Ivanov V.V. Study of the micro/nanoprofile of zinc coating during vibration mechanochemical processing of hydrocarbon steels / V.V. Ivanov, A.P. Babichev, V.E. Burloikova and others // *Hardening technologies and coatings*, 2014, No. 7. – P.46-49.

18 Kadyrmetov A.M. Control of technological support for plasma coating processes in the mode of modulation of electrical parameters. Voronezh: IPC “Scientific Book”. 2013. -260 s.

19 Kiselev V.A. Galvanizing of fasteners / Kiselev V.A., N.N. Sorokin // *Protection of Metals*, 1987. T. 23, No. 2. – P.287-289.

20 Lebedev V.A. Energy model of the formation of vibration mechanochemical coatings / V.A. Lebedev, V.V. Ivanov, V.D. Sokolov et al. // *Nanoengineering*, 2013. No. 5 – P.11-

21 Lysenko L.A. Study of the mechanism of formation of zinc coating on carbon steel parts under vibration processing conditions / L.A. Lysenko, L.G. Kolodyazhnaya // *Resource-saving technologies for production and pressure treatment of materials in mechanical engineering*. Lugansk: Publishing house VNU im. In Dalia, 2008. – P.209-215.