

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.793

doi: 10.30987/2782-5957-2023-11-4-14

СВЯЗЬ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ С АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТЬЮ ВИБРАЦИОННЫХ МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Валерий Александрович Лебедев^{1✉}, Сергей Юрьевич Штынь², Илья Дмитриевич Кукаркин³

^{1,2,3} Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ va.ledidev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1838-245X>

² sshtyn@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9454-5203>

³ ilya.kukarkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1188-0782>

Аннотация

Статья раскрывает связь коррозионной стойкости с прочностью механохимических цинковых покрытий, сформированных в вибрационных технологических системах.

Показано, что процесс нанесения покрытий представляет собой совокупность одновременно протекающих в поверхностном слое металла механических и физико-химических явлений при ударно-импульсном воздействии на него инденторов активирующей среды в условиях низкочастотных колебаний; при этом в зоне локального контактного взаимодействия «покрытие-подложка» формируется покрытие, основным параметром которого является адгезия.

Установлено, 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 покрытию.

Предложена корреляционная зависимость коррозионной стойкости оцениваемого показателем

проницаемости, от адгезионной прочности покрытия, позволяющая на этапе технологической подготовки производства 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.

Отмечено: технологическая эффективность процесса нанесения покрытия при управлении механическими параметрами на 2-3 % выше по сравнению с регулированием процесса химическими параметрами; для образцов из конструкционной стали при выбранных условиях нанесения покрытия коррозионная стойкость увеличивается от 9,8 до 46,6 раз по отношению к непокрытым образцам, что свидетельствует о высоком уровне защитных антикоррозионных свойствах вибрационных механохимических цинковых покрытий.

Ключевые слова: покрытие, прочность, коррозионная стойкость, среда, индентор.

Финансирование: работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-38-00276.

Ссылка для цитирования:

Лебедев В.А. Связь коррозионной стойкости поверхности деталей с адгезионной прочностью вибрационных механохимических покрытий / В.А. Лебедев, С.Ю. Штынь, И.Д. Кукаркин // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 11. – С. 4-14. doi: 10.30987/2782-5957-2023-11-4-14.

Original article
Open Access Article

THE RELATIONSHIP OF CORROSION RESISTANCE OF PART SURFACE WITH ADHESIVE STRENGTH OF VIBRATIONAL MECHANOCHEMICAL COATINGS

Valery Aleksandrovich Lebedev^{1✉}, Sergey Yurievich Shtyn², Ilya Dmitrievich Kukarkin³

^{1,2,3} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ va.ledidev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1838-245X>

² sshtyn@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9454-5203>

³ ilya.kukarkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1188-0782>

Abstract

The paper shows the relationship of corrosion resistance with the strength of mechanochemical zinc coatings formed in vibration technological systems.

It is considered that coating process is a combination of mechanical and physico-chemical phenomena occurring simultaneously in the surface layer of the metal under the shock and pulse action of the activating medium indentors on it under conditions of low-frequency oscillations; at the same time, a coating is formed in the zone of local coating-substrate contact interaction, and its main parameter is adhesion.

It is found out that the same adhesive strength of the coating can be provided as a result of varying the energy contribution to the process of coating formation by the chemical interaction of the coating medium with metal and the mechanical action of the indentors on the surface to be coated.

The correlation dependence of the corrosion resistance estimated by the permeability indicator on the

adhesive strength of the coating is proposed, which allows at the stage of technological preparation of production to design technological regulations with sufficient accuracy for practice by regulating the mechanical and chemical parameters of the process, while providing the adhesive strength required by the operating conditions and the most environmentally preferable conditions for the coating.

It is noted: the technological efficiency of the coating process with the control of mechanical parameters is 2-3 % higher compared to the control of the process by chemical parameters; for structural steel samples, under the selected coating conditions, corrosion resistance increases from 9.8 to 46.6 times in relation to uncoated samples. This indicates a high level of protective anticorrosive properties of vibrational mechanochemical zinc coatings.

Keywords: coating, strength, corrosion resistance, medium, indenter.

Funding: the work is done with RFBR support, grant No. 16-38-00276.

Reference for citing:

Lebedev VA, Shtyn SYu, Kukarkin ID. The relationship of corrosion resistance of part surface with adhesive strength of vibrational mechanochemical coatings. *Transport Engineering*. 2023; 11:4-14. doi: 10.30987/2782-5957-2023-11-4-14.

Введение

Процесс нанесения вибрационных механохимических покрытий является термодинамическим, представляющий собой совокупность одновременно протекающих в поверхностном слое металла механических и физико-химических явлений при ударно-импульсном воздействии на него инденторов активирующей среды в условиях низкочастотных колебаний. В результате протекания этих явлений в зоне локального контактного взаимодействия «покрытие-подложка» формируется покрытие, основным параметром которого является адгезия, характеризующаяся энергией и силой адгезии, прочностью сцепления [1]. В работах [2-7] показано, что механизм формирования покрытия на поверхности металлов зависит от следующих характеристик:

- природы контактирующих материалов и их физико-химических свойств;
- степени участия металлической основы в образовании покрытия;
- условий и режимов виброволнового воздействия, вида и гранулометрических характеристик инденторов.

Учитывая, что прочность соединения «покрытие-подложка» является следствием адгезии в качестве фундаментальной энергетической характеристики, определяющей прочность формируемого на поверхности металла покрытия, предложена средняя энергия единицы связи, обеспечивающая адгезию модифицированного путём механохимического синтеза локального микрообъёма на границе раздела контактирующих сред [1, 8].

Установление корреляционной связи между коррозионной стойкостью модифицированной поверхности и прочностью механохимических покрытий, сформирован-

Материалы, модели, эксперименты и методы

Предметом исследований выбран процесс нанесения цинкового покрытия (ВМХЦП), которое решает одну из важнейших эксплуатационных задач – повышение коррозионной стойкости поверхности деталей. Для оценки коррозионной стойкости поверхностных слоёв, модифицированных в процессе нанесения покрытия предложен параметр проницаемости в виде:

$$P_E = 8,76 \frac{\Delta m}{K_E \rho_D},$$

где Δm – потери массы детали отнесенной к площади поверхности, г/м²; K_E – коэффициент влияния адгезии на изменение плотности модифицированной поверхности.

Покрытие наносилось на цилиндрические образцы, изготовленные из материала сталь 25, сталь 35 и сталь 45, 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 4×10. В качестве технологической среды покрытия использовалась цинковая суспензия, состоящая из воды, порошка Zn марки ПЦ-2 (ГОСТ 3640-79) и порошка хлористого цинка $ZnCl_2$ (вязкость раствора составляла не менее $8,94 \cdot 10^{-4}$ 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.

Результаты исследований

Для оценки влияния механической активации на процесс формирования покрытия и его адгезионную прочность приняты условия, обеспечивающие 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

ных в вибрационных технологических системах (ВТС), является целью настоящего исследования.

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 NI рассчитывалась по зависимости, связывающей ее с критической латеральной нагрузкой F_l^c начала отрыва пленки от подложки следующим образом:

$$G = \frac{(F_l^c)^2 \delta}{\pi r_c^4 E_f},$$

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

Толщин нанесенного покрытия определялась толщиномером 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 осуществлялась на металлографическом микроскопе, оснащённом тринокулярной визуальной насадкой с видимым увеличением от 40 до 400 раз.

Испытания на коррозионную стойкость проводились на стенде СИС-46. Массу образцов определяли на аналитических весах *SHINKO AF* с разрешением до 0,01 мг.

$A_0 = 1$ мм и частоте колебаний рабочей камеры $f_0 = 10...15$ Гц. Для обоснования приемлемости этих пороговых значений амплитуды и частоты колебаний рабочей камеры для оценки эффективности влияния механической активации на процесс формирования вибрационных механохимических покрытий, была проведена серия экспериментальных исследований, приведённых в табл. 1, 2.

Таблица 1

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

Table 1

Study results on finding the threshold frequency of working chamber vibrations that provides an effective influence of mechanical activation on the process of forming vibrational mechanochemical zinc coatings (VMCZC)

Технологические регламенты	Показатели	Частота колебаний рабочей камеры, Гц			
		15	25	33	45
Образец из стали 35, амплитуда – 2,5 мм; индентор – стальной шар	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

Table 2

Study results on finding the threshold amplitude of working chamber vibrations, that provides an effective influence of mechanical activation on the process of forming VMCZC

Технологические регламенты	Показатели	Амплитуда колебаний рабочей камеры, мм			
		1,0	1,5	2,0	2,5
Образец из стали 35, частота – 33 Гц; индентор – стальной шар	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 при-

ведены в табл. 3, 4, а характерная для них закономерность показана на рис.1.

Таблица 3

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

Table 3

Experimental and calculated values of the adhesive strength of VMCZC G , J/mole obtained on steel 35 samples as a result of shock and pulse action of porcelain indentors with 6 mm diameter at various vibration frequencies of the working chamber

Технологические регламенты	Показатели	Частота колебаний рабочей камеры, Гц			
		15	25	33	45
Образец из стали 35, амплитуда – 2,5 мм; индентор – фарфоровый шар	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

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

Table 4

Experimental and calculated values of the adhesive strength of VMCZC G , J/mole obtained on steel 35 samples as a result of shock and pulse action of steel indentors with 6 mm diameter at various vibration frequencies of the working chamber

Технологические регламенты	Показатели	Частота колебаний рабочей камеры, Гц			
		15	25	33	45
Образец из стали 35, амплитуда – 2 мм; индентор – стальной шар	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

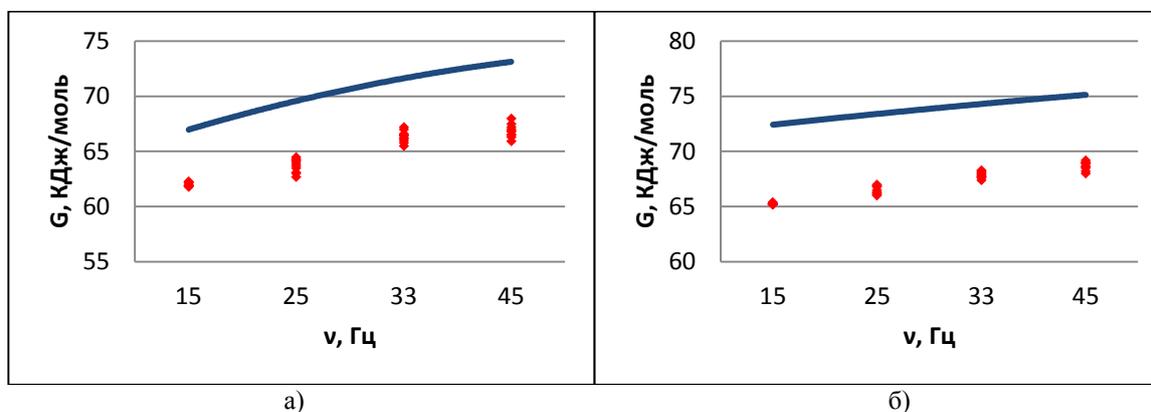


Рис.1. Зависимость адгезионной прочности покрытия сталь 35-Zn от частоты колебания рабочей камеры; А – 2,5 мм, $t = 40$ мин, концентрация технологической среды 50 г/л порошка Zn ПЦ-2 ГОСТ 360-79: а - фарфоровые шары диаметром Ø6-9 мм; б – стальные шары диаметром Ø2-6 мм
 Fig.1. Dependence of the adhesive strength of steel 35-Zn coating on the vibration frequency of the working chamber; A – 2.5 mm, $t = 40$ min, process medium concentration is 50 g/l of Zn ПЦ-2 powder GOST 360-79: а – porcelain balls with Ø6-9mm diameter; б – steel balls with Ø2-6mm diameter

По результатам проведённых исследований, построена диаграмма накопления внутренней энергии в локальном микрообъёме поверхностного слоя модифицированного в процессе механохимического синтеза нанесения покрытия в вибрационной технологической системе, определяющей его адгезионную прочность в зависимости от изменения энергетического состояния инденторов рабочей среды, активирующей процесс формирования покрытия (рис. 2).

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, приложенной для её описания. Время вибрационной механохимической обработки, обуславливающего величину энергии при росте энтропии, было выбрано постоянным, а значения амплитудно-частотных характеристик колебаний рабочей камеры на уровне пороговых, изменяя концентрацию структурных составляющих цинкового раствора и его химическую активность (определялось изменение адгезионной прочности покрытия экспериментальное и расчётное) [3].

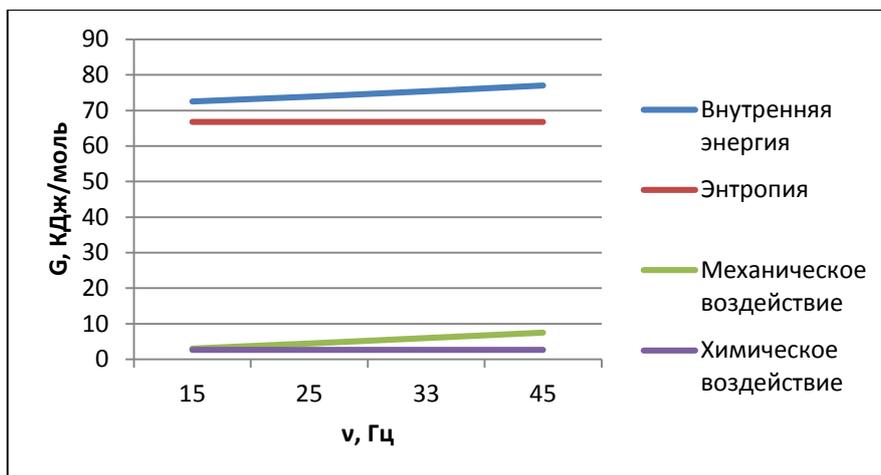


Рис. 2. Диаграмма накопления внутренней энергии в локальном микрообъёме ВиМХЦП при изменении энергетического состояния инденторов рабочей среды, активирующей процесс формирования покрытия

Fig. 2. Diagram of internal energy accumulation in the local micro-volume of VMCZC with a change in the energy state of working medium indentors activating the coating formation process

Результаты исследований влияния химической активности цинкового раствора на адгезионную прочность покрытия,

сформированного в вибрационной технологической системе, представлены в табл. 5 (рис. 3).

Таблица 5

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

Table 5

Experimental and calculated values of the adhesive strength of VMCZC G , J/mole obtained on steel 35 samples as a result of shock and pulse action of porcelain indentors with 6 mm diameter at the vibration frequency of the working chamber $f = 15$ Hz, amplitude $A = 2.5$ mm, processing time $t = 40$ min and the use of a coating medium of different composition

Технолог. 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, индентор – фарфоровый шар	Диапазон изменения, $G_{\text{экс}}$	65,2-65,6	66,1-66,5	66,5-67
	$G_{\text{экс. ср}}$	65,45	66,34	66,81
	$G_{\text{расч.}}$	72,35	73,7	74,5
	Погрешность, %	10,5	11,0	11,5

По результатам проведённых исследований, построена диаграмма накопления внутренней энергии в локальном микрообъёме 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 (рис. 4).

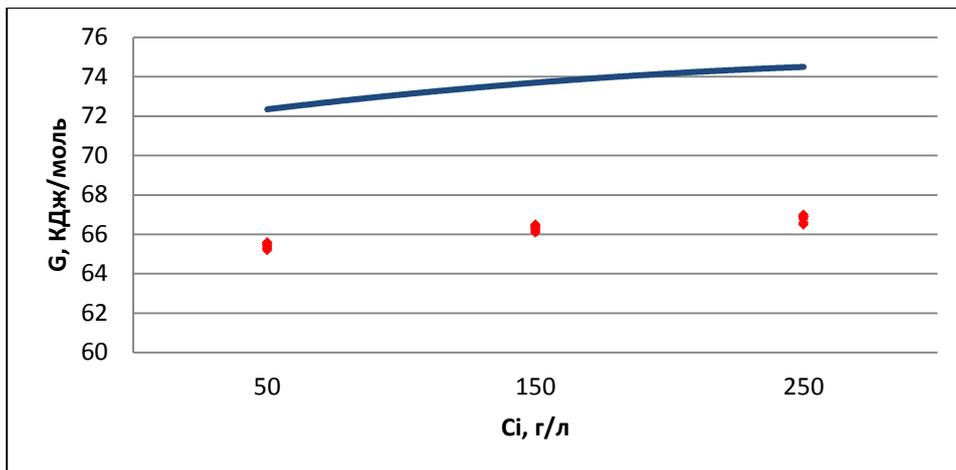


Рис. 3. Зависимость адгезионной прочности цинкового ВиМХЦП от концентрации цинкового раствора, для образцов из стали 35; $A = 2,5$ мм, $\nu = 25$ Гц; $t = 40$ мин, инденторы – стальные шары диаметром $\varnothing 2$ -6мм
 Fig. 3. Dependence of the adhesive strength of zinc VMCZC on zinc solution concentration, for samples made of steel 35; $A = 2.5$ mm, $\nu = 25$ Hz; $t = 40$ min, indentors are steel balls with $\varnothing 2$ -6mm diameter

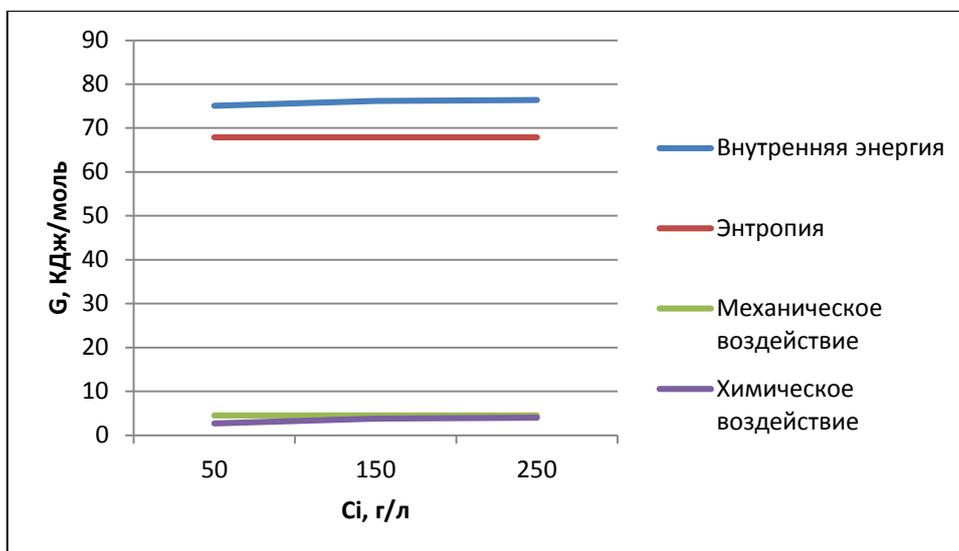


Рис. 4. Диаграмма накопления внутренней энергии в локальном микрообъёме ВиМХЦП при изменении химической активности технологической среды покрытия
 Fig. 4. Diagram of internal energy accumulation in the local micro-volume of VMCZC with changes in the chemical activity of the coating medium

В работах [4, 8] показано, что одну и ту же адгезионную прочность покрытия можно обеспечить в результате варьирования энергетического вклада в процесс формирования химического взаимодействия технологической среды покрытия с металлом и механического воздействия инденторов на поверхность, подвергаемую покрытию.

Для экспериментального определения зависимости коррозионной стойкости опытных образцов от адгезионной прочности получаемого покрытия, были определены значения параметра проницаемости $P_{Eпок}$ и коэффициента влияния адгезии на изменение плотности модифицированного поверхностного слоя K_E , представленные в табл. 6.

Экспериментальные значения параметра проницаемости и коэффициента влияния адгезии на изменение плотности поверхностного слоя образцов из стали 35 модифицированной в процессе нанесения ВиМХЦП

Experimental values of the permeability parameter and the coefficient of adhesion effect on the change in the density of the surface layer of samples made of steel 35 modified while applying VMCZC

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		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

Заключение

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил установить следующее:

- изменение частоты колебаний рабочей камеры в диапазоне от $\nu = 15$ Гц до $\nu = 45$ Гц приводит к увеличению вклада механической активации в энергетическое состояние, формирующегося на поверхности образцов из стали 25, 35 и 45 цинкового покрытия 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. Результаты теоретических исследований, получившие отражение в аналитической модели технологической системы вибрационной механохимической обработки [3, 7] предполага-

ют, что с ростом твердости материала подвергаемого покрытия, 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 стальных шаров уровень механической активации поверхности детали выше при большей массе стальных инденторов;

- расхождение экспериментальных и расчётных значений адгезионной прочности находится в пределах экспериментальной ошибки (4,8...16 %), это 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 (твердость, модуль упругости и др.).

Из представленной на рис. 2 диаграмме следует, что вклад механической активации в изменение энергетического состояния локального объема цинкового покрытия, сформированного в вибрационной технологической системе в пределах продолжительности обработки, установ-

ленной 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 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 [3, 7, 8] 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 объема 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 выявлена незначительная их разница при увеличении концентрации технологической среды, что говорит о примерно одинаковом химическом составе используемых марок стали. Также установлено, что при увеличении концентрации раствора $ZnCl_2$ на 200 % рост адгезионной прочности составляет до 1,01 раза.

Проведенные 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 веществом необходимо провести более 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).

Аппроксимация кривых, представленных на рис. 5, позволила описать их логарифмической функцией, имеющей наиболее высокий коэффициент детерминации R^2 . Так для образцов из марки стали 35 коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,9983$ (рис. 5).

$$K_{E35} = 15,986 \ln(E_a) + 12,67.$$

В общем виде эмпирическая формула для оценки изменения 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:

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

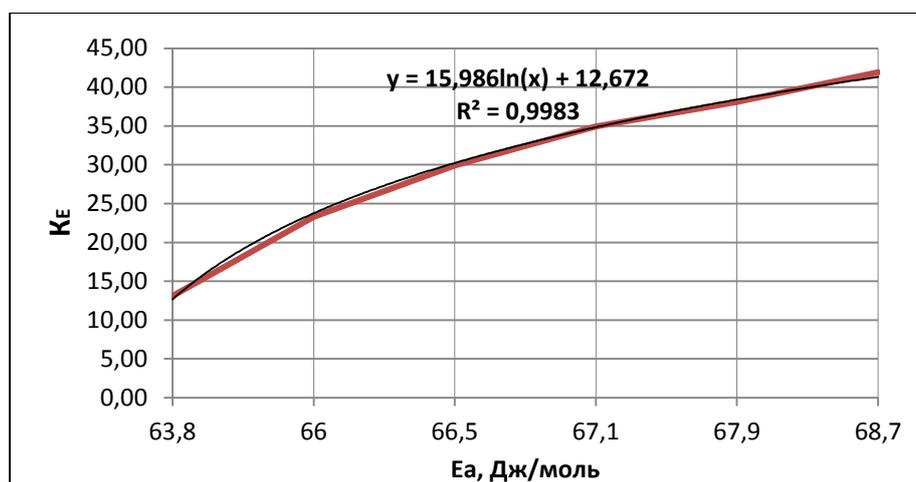


Рис. 5. Зависимость коэффициента K_E от адгезионной прочности ВиМХП нанесенных на поверхность образцов из стали 35

Fig. 5. Dependence of K_E coefficient on the adhesive strength of VMCZC applied on the surface of steel 35 samples

Проведенные исследования показали, что для образцов из конструкционной стали при выбранных условиях нанесения покрытия, коррозионная стойкость увеличивается от 9,8 до 46,6 раз по отношению к

непокрытым образцам. Данный факт подтверждает высокие защитные антикоррозионные свойства вибрационных механохимических цинковых покрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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
2. Бабичев А.П. Вибрационная механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей машин / А.П. Бабичев, В.В. Иванов, С.Н. Худалей и др. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2012. С. 204.
3. 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. С. 34-39.
4. Иванов В.В. Вибрационные механохимические методы нанесения покрытий. (цинкование). Издательский центр ДГТУ. Ростов н/Д, 2010.
5. 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. С. 15-20.
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. 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.
8. 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 технологгов-машиностроителей, г. Ростов-на-Дону, 3-7 окт. 2017 г. / ДГТУ, 2017.

REFERENCES

1. Shtyn SYu. The energy condition of forming vibration mechanochemical coatings and the assessment of their adhesive strength. Proceedings of International Science and Technology Conference, November 10-11, 2016: Problems and Prospects of Mechanical Engineering Development; Lipetsk State Technical University. Lipetsk; 2016.

2. Babichev AP, Ivanov VV, Khudaley SN. Vibration mechanochemistry in the processes of finishing and hardening treatment and coatings of machine parts. Rostov-on-Don: DSTU Publishing Center; 2012.
3. Lebedev VA, Shtyn SYu, Ivanov VV, Davydova IV. Energy condition for the formation of vibration mechanochemical coatings and assessment of their adhesive strength. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2015;8:34-39.
4. Ivanov VV. Vibration mechanochemical methods of coating (zinc coating). Rostov-on-Don: DSTU Publishing Center; 2010.
5. Lebedev VA, Shtyn SYu, Sokolov VD, Yagmurov MA. Studies of the energy state of the surface layer hardened by methods PPD. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2015;9:15-19.
6. Shtyn SYu, Ivanov VV. Features of mechanochemical coating processes in the surface layer under conditions of vibro-wave effects. *Proceedings of TSU. Technical Sciences*. 2016;8(2).
7. Lebedev VA, Shtyn SYu, Ivanov VV, Kapustyan-sky SV. Production of coatings in vibro-wave technological systems on the basis of process mechanochemical synthesis power model control. *Vestnik of PA Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University*. 2017;2(4.2).
8. Shtyn SYu, Sokolov VD. Management of mechanochemical synthesis of applying vibration mechanochemical coatings based on the power model. *Proceedings of the International Symposium of Engineering Technologists, October 3-7, 2017: Promising Directions of Developing Finishing Methods of Machining Parts*; Rostov-on-Don: DSTU; 2017.

Информация об авторах:

Лебедев Валерий Александрович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты», почетный работник высшего профессионального образования, тел. 89515395159.

Lebedev Valery Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal-cutting Machines and Tools, Honorary Worker of Higher Professional Education; phone: 89515395159.

Штын Сергей Юрьевич – аспирант кафедры «Технология машиностроения», тел. 89287622230.

Кукаркин Илья Дмитриевич – аспирант. кафедры «Технология машиностроения», тел. 89525842705.

Shtyn Sergey Yurievich – Postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering Technology; phone: 89287622230.

Kukarkin Ilya Dmitrievich – Postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering Technology; phone: 89525842705.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 10.10.2023; одобрена после рецензирования 23.10.2023; принята к публикации 27.10.2023. Рецензент – Хандожко А.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, главный редактор журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 10.10.2023; approved after review on 23.10.2023; accepted for publication on 27.10.2023. The reviewer is Khandozhko A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.