

Машиностроение, (12), 88-93.

13. Гордеев, Ю. В., & Серебряков, И. П. (2018). Исследование влияния параметров лазерной наплавки на адгезионные свойства покрытий. Поверхностные явления и покрытия, (4), 110-116.

14. Макаров, В. С., & Кузнецов, Д. С. (2019). Трибологические свойства покрытий, нанесенных лазерной наплавкой с применением нанопорошков. Вестник НГТУ им. Р.Е. Алексеева, (5), 96-103.

15. Иванов, С. А., & Петров, Н. В. (2020). Влияние состава порошков на триботехнические характеристики покрытий, полученных лазерной наплавкой. Техника и технология, (2), 55-61.

D. V. Lyashenko<sup>1</sup>, M. V. Lyashenko<sup>1</sup>, Y. Naghawi<sup>2</sup>, A. D. Breki<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
Saint Petersburg, Russia, liashenko.dv@gmail.com

<sup>2</sup>The University of Jordan, Amman, Jordan

### **Tribological studies of coatings applied by means of a robotic technological installation of laser surfacing on samples simulating shafts of rotor-boosters.**

This study focuses on the tribological investigations of coatings applied by a robotic technological installation of laser cladding on samples simulating shafts of rotor-boosters. Restorative cladding is used for repairing and restoring parts that have been damaged during operation, and the quality of this cladding is crucial for ensuring the durability and reliability of the restored parts. The research results will help improve existing cladding technologies and develop recommendations for the preparation and treatment of parts, contributing to enhanced performance characteristics and reduced repair and maintenance costs.

*Keywords:* surfacing, wear, tribology, coating, friction, metallographic analysis.

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-248

Д.А. Виноградов<sup>1,2</sup>, Д.В. Ляшенко<sup>1,2</sup>, М.А. Ковалёв<sup>1,2</sup>, Qian Jiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

<sup>2</sup>НТК «Новые технологии и материалы»

Санкт-Петербург, Россия. den895619@gmail.com

<sup>3</sup>Changchun University, Changchun, 6543, Satellite Road, China

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕКОМПРЕССИИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И ПОЛИМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ**

#### **Аннотация**

В работе изучалось влияние циклической декомпрессии на изменение свойств систем дуплексного металл-полимерного (ZiPLY97) и металлического (FeZn) покрытий, предполагающихся для нанесения на внутреннюю поверхность труб нефтегазовой отрасли. По результатам исследований, проведение циклических декомпрессионных испытаний может быть использовано, как альтернативный метод подтверждения разрушения покрытия.

*Ключевые слова:* антикоррозионные покрытия, полимерные покрытия, автоклавные испытания, декомпрессия

## Введение

Трубы, эксплуатирующиеся в нефтегазовой отрасли, подвергаются воздействию ряду агрессивных факторов, приводящих к их разрушению и высокому экономическому ущербу [1-3] – внутренняя стенка труб постоянно взаимодействует с перекачиваемыми продуктами, которые содержат в себе большое количество коррозионно-активных компонентов, в числе которых присутствуют сероводород и двуокись углерода [4-6]. Высокая агрессивность среды приводит к заметному снижению срока службы незащищённого трубопровода в сравнении с менее агрессивными условиями эксплуатации, поэтому с целью увеличения их долговечности были предложены и в последствии активно используются ряд методов их защиты, одним из которых является нанесение защитных антикоррозионных покрытий [7-11]. Перекачка продуктов зачастую происходит за счёт повышенного давления, из-за чего одним из возможных видов аварийных ситуаций может являться декомпрессия, представляющая собой резкий сброс давления [12]. Покрытия особенно чувствительны к данному явлению и склонны к отслоению/растрескиванию, лишаясь защитных свойств и провоцируя начало интенсивного процесса коррозии подложки. Стандарт, моделирующий взрывную декомпрессию и используемые производителями для оценки качества покрытий – ГОСТ Р 58346-2019 – разработан для лакокрасочных покрытий и предлагает качественную оценку стойкости на основании изменения внешнего вида после одного цикла декомпрессии [13].

Целью данной работы являлось изучение влияния циклической декомпрессии на свойства систем как лакокрасочных, так и металлических покрытий.

## Методы и материалы

Для исследований были отобраны две системы антикоррозионных защитных покрытий для внутренней стенки нефтепровода с габаритными размерами образца 100x50 мм – система биметалла (FeZn) и система FeZn+фенол-эпоксид (ziPLY97) (Рис.1).



Рисунок 1 – Общий внешний вид образцов для испытаний а) FeZn б) ziPLY97

Методика исследований представляла собой проведение трёх циклов стандартных декомпрессионных автоклавных испытаний, приведённых в ГОСТ Р 58346-2019 приложение Д [13] (Табл. 1) с последующей оценкой деградации систем путём визуального осмотра, определения адгезии методом нормального отрыва, измерением микротвёрдости и проведением металлографических исследований. Всего испытаниям подвергались три образца от каждой системы. После каждого цикла испытаний по одному образцу отбиралось для исследований.

Таблица 1 – Условия декомпрессионных испытаний

Состав газовой фазы	Состав жидкой фазы	Температура испытаний	Время до полного сброса давления
5 МПа CO <sub>2</sub>	5% NaCl	+80°C	< 5 секунд

Моделирование условий декомпрессии проводилось в автоклаве объёмом 1500 мл, изготовленного из нержавеющей стали. Нагрев осуществлялся при помощи нагревательной ленты, температура контролировалась внешней и внутренней термопарами через измеритель-регулятор «ОВЕН» (Рис. 2).



Рисунок 2 – Общий вид автоклавного комплекса

Визуальная оценка проводилась с учётом стандарта ГОСТ 9.407-2015 [14] и включала осмотр покрытий на предмет деградации поверхности.

Оценка величины адгезии покрытия проводилась по стандарту ГОСТ 32299-2013 [15]. В качестве клея применялся «3М Scotch-Weld DP460». Выдержка для полимеризации клея составляла 1 день. Скорость разрыва не превышала 1 МПа в секунду, а общее время отрыва грибка не превышало 90 секунд.

Металлографические исследования проводились с использованием оптического микроскопа «Reichert-Jung MeF3A» и программного комплекса «Thixomet» (Рис. 3). Съёмка проводилась при увеличениях до  $\times 200$ . Исследования включали в себя осмотр поперечного сечения образцов. Разделка образцов проводилась с использованием отрезного станка после чего поверхность поперечного сечения подготавливалась с использованием шлифовальных кругов и полировальных тканей совместно с алмазными суспензиями различной грубости. Финальной стадией подготовки являлась ткань с абразивными частицами размером 3 мкм.

Дополнительным методом оценки деградации являлось определение изменения величины микротвёрдости поверхности. Ввиду высокой шероховатости поверхности системы FeZn, непосредственно перед замером поверхность предварительно обрабатывалась шлифовальным кругом зернистостью P120. Замеры микротвёрдости полимерной поверхности проводились при нагрузке в 50 граммов и выдержке 15 секунд, для металлической поверхности при нагрузке 180 граммов и выдержке 15 секунд.

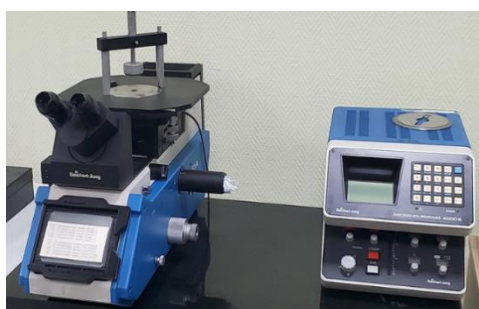


Рисунок 3 – Стенд для металлографических исследований

## Результаты и обсуждение

После трёх циклов декомпрессии, внешние изменения системы ZiPLY97 отсутствовали. На поверхности системы FeZn отмечались продукты коррозии цинка после первого цикла испытаний с последующим образованием продуктов коррозии подложки (Рис. 4). Полученные результаты визуального осмотра говорят о вероятном разрушении системы FeZn после 1 или в течение второго цикла испытаний.

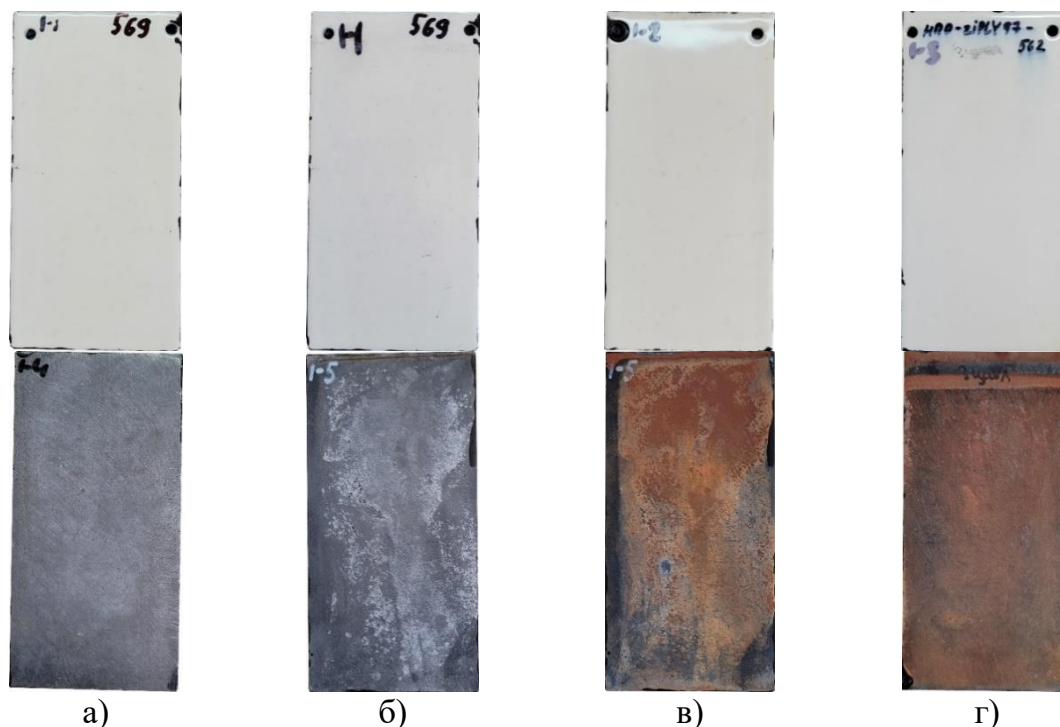


Рисунок 4 – Внешний вид образцов ZiPLY97 и FeZn до/после после испытаний соответственно а) исходные б) 1 цикл в) 2 цикл г) 3 цикл

Снижение адгезии системы ZiPLY97 составляло в среднем ~50% уже после первого цикла испытаний и не изменялось с увеличением числа циклов. Характер отрыва изменился с преимущественно когезионного отрыва слоя краски на преимущественно адгезионный отрыв между полимерным и металлическим слоями.

Величина адгезии системы FeZn увеличилась на ~35% и с увеличением числа циклов вернулась в исходное значение. Характер отрыва системы не изменялся и представлял собой преимущественно когезионный отрыв металлического слоя. Данный характер изменения свойств был вероятно вызван разбросом значений ввиду изначально невысокой величины адгезии системы и в действительности деградация системы отсутствовала.

В табл. 2 и на рис. 5 приведены обобщённые результаты оценки величины адгезии и зоны отрыва.

Таблица 2 – Средняя величина адгезии методом нормального отрыва

Система	Величина адгезии, МПа			
	Исходная	1 цикл	2 цикл	3 цикл
ZiPLY97	19,44	7,97	10,34	8,40
FeZn	7,08	9,54	7,84	7,05

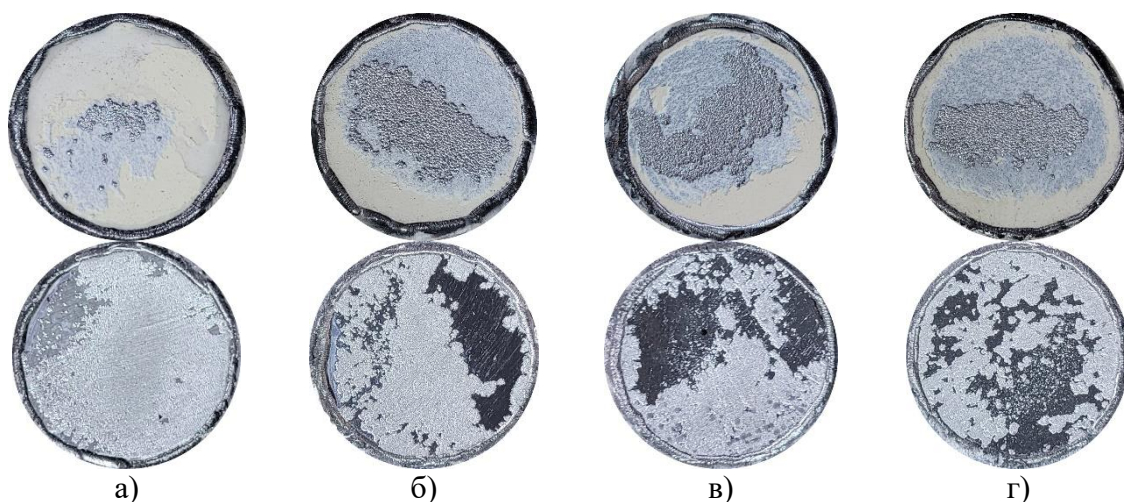


Рисунок 5 – Внешний вид образцов ZiPLY97 и FeZn до/после после испытаний соответственно а) исходные б) 1 цикл в) 2 цикл г) 3 цикл

Аналогично изменению величины адгезии, максимальное изменение микротвёрдости системы ZiPLY97 присутствовало после первого цикла испытаний и не изменялось при последующих. Снижение в среднем составляло ~20%.

Для системы FeZn наблюдался рост микротвёрдости в среднем на ~10% после первого цикла испытаний и после не изменялся.

В табл. 3 приведены обобщённые результаты замера микротвёрдости.

Таблица 3 – Средняя величина микротвёрдости поверхности

Система	Величина микротвёрдости, HV			
	Исходная	1 цикл	2 цикл	3 цикл
ZiPLY97	34,20	27,80	27,65	27,28
FeZn	332	361	364	359

При изучении поперечного сечения, система ZiPLY97 не имела изменений в поперечном сечении в течение всех трёх циклов испытаний как в полимерном слое, так и в металлическом (Рис. 6а). Металлический слой системы FeZn разрушился уже после первого цикла испытаний, что в поперечном сечении выражалось в виде растрескивания слоя, глубина которого достигала подложки (Рисунок 6б). Наличие такого вида разрушения упростило доступ коррозионных агентов к основному металлу и привело к началу коррозии, что косвенно можно было наблюдать по наличию сплошных продуктов коррозии на поверхности покрытия после второго и третьего циклов испытаний (Рис. 4).

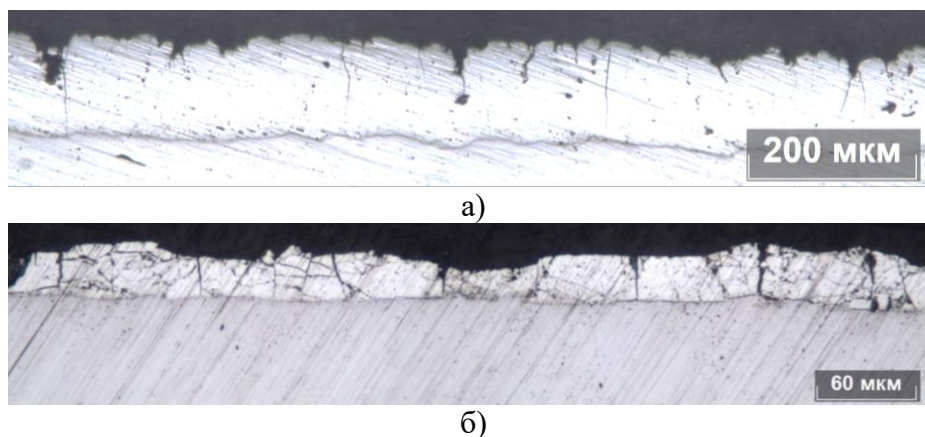


Рисунок 6 – Внешний вид поперечного сечения после трёх циклов декомпрессионных испытаний а) Покрытие системы ZiPLY97; б) покрытие системы FeZn, 200

При попытке обнаружить признаки растрескивания на поверхности системы FeZn, их наличие подтверждалось только при использовании оптических приборов (Рис. 7). С увеличением числа циклов, интенсивность растрескивания не возрастала.

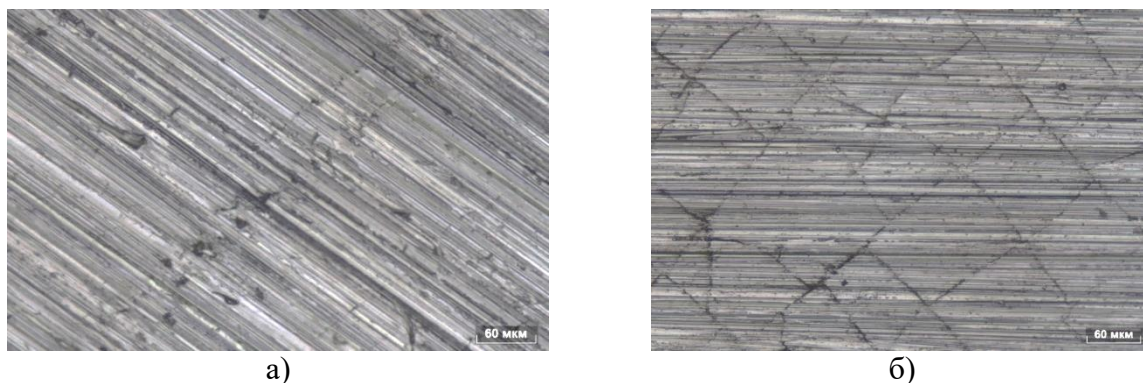


Рисунок 7 – Поверхность покрытия системы FeZn а) свидетель; б) после 2 циклов декомпрессионных испытаний, x200

### Заключение

По результатам исследований влияния циклической декомпрессии, условия которой приведены в стандарте ГОСТ Р 58346-2019 на системы металл-полимерного и металлического покрытий можно отметить, что:

1. Основные изменения в адгезии, внешнем виде и микротвёрдости произошли после первого цикла испытаний;
2. Система FeZn, разрушилась после первого цикла испытаний, при проведении последующих проявила склонность к образованию продуктов коррозии подложки на поверхности. Таким образом, проведение второго цикла автоклавных испытаний может быть использовано, как дополнительный метод подтверждения разрушения покрытия при отсутствии возможности проведения металлографических исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Makhlouf A. S. H., Aliofkhazraei M. (ed.). Handbook of materials failure analysis with case studies from the oil and gas industry. – Butterworth-Heinemann, 2015.
2. Короткова Т. Г., Боженова К. С. Статистика и причины аварий на объектах нефтегазодобычи //Электронный сетевой политематический журнал" Научные труды КубГТУ". – 2019. – №. 1. – С. 115-127.
3. Шкандратов В. В., Ким С. К. Актуальные проблемы коррозии, методы и технологии антикоррозионной защиты, внедряемые на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» //Территория Нефтегаз. – 2007. – №. 3. – С. 24-33.
4. S. Nestic, Key Issues Related to Modelling of Internal Corrosion of Oil and Gas Pipelines – a Review, Corrosion Science, 49 (2007), 4308-38
5. M. Singer, B. Brown, A. Camacho, and S. Nestic, Combined effect of carbon dioxide, hydrogen sulfide, and acetic acid on bottom-of-the-line corrosion, Corrosion, vol. 67, no. 1, 2011
6. H. Fang, B. Brown, S. Nescaronicacute, Effects of sodium chloride concentration on mild steel corrosion in slightly sour environments, Corrosion, vol. 67, no. 1, 2011.
7. Данкин В. Д., Масютина Е. У., Ловцова Е. М. Экономические аспекты использования труб с внутренним антикоррозионным покрытием //Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2011. – №. 5. – С. 23-25.
8. Кундик А. А. Обеспечение надежности трубопроводных систем. Метод диагностики внутреннего антикоррозионного покрытия трубопроводов //ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2022. – №. 1. – С. 74-76.

9. Агафонова Г. Л., Кожаева А. В. Опыт применения лакокрасочных материалов для противокоррозионной защиты нефтепромышленного оборудования ОАО АНК «Башнефть» //Территория Нефтегаз. – 2012. – №. 3. – С. 40-44.

10. Юдин П. Е., Александров Е. В., Иоффе А. В. Проблемы обеспечения стабильности качества и методы прогнозирования сроков эксплуатации внутренних антикоррозионных покрытий труб и фасонных изделий //Коррозия Территория Нефтегаз. – 2012. – №. 5. – С. 12-14.

11. N. Sangaj, V. Malshe, Progress in Organic Coatings, 50 (1), 28-39 (2004)

12. Юдин П. Е. Анализ причин разрушения внутренних антикоррозионных покрытий нефтепроводных и насосно-компрессорных труб //Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2014. – №. 1 (41). – С. 85-92.

13. ГОСТ Р 58346-2019. Трубы и соединительные детали стальные для нефтяной промышленности. Покрытия защитные лакокрасочные внутренней поверхности. Общие технические требования.

14. ГОСТ 9.407-2015. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида.

15. ГОСТ 32299-2013. Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва, 2013.

D.A Vinogradov<sup>1,2</sup>, D.V. Lyashenko<sup>1,2</sup>, M.A. Kovalev<sup>1,2</sup>, Qian Jiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

<sup>2</sup>STC «New technologies and materials»,

Saint Petersburg, Russia. den895619@gmail.com

<sup>3</sup>Changchun University, Changchun, 6543, Satellite Road, China

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CYCLIC DECOMPRESSION ON METAL AND POLYMER COATINGS

### Abstract

The paper studied the effect of cyclic decompression on changes in the properties of duplex metal-polymer (ZiPLY97) and metal (FeZn) coatings intended for application to the inner surface of pipes in the oil and gas industry. According to the research results, cyclic decompression tests can be used as an alternative method to confirm the destruction of the coating.

*Keywords:* anticorrosive coatings, polymer coatings, autoclave tests, decompression

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-249

В.О. Токарев<sup>1,2</sup>, Д.А. Виноградов<sup>1,2</sup>, М.А. Ковалёв<sup>1,2</sup>, Pan Yuan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

<sup>2</sup>НТК «Новые технологии и материалы»

Санкт-Петербург, Россия. den895619@gmail.com

<sup>3</sup>Jiangsu Pedagogical University, Xuzhou, 101 Shanghai Road, China

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ