



05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**К ВОПРОСУ ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЯ ЖЕЛЕЗА ПОВЫШЕННОЙ ТОЛЩИНЫ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОГАЛЬВАНИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С МЕХАНИЧЕСКИМ ПОСЛОЙНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ**

✉<sup>1</sup>**Горожанкина Ольга Владимировна**  
ст. преподаватель кафедры самолетостроения Воронежского государственного технического университета (Российская Федерация),  
e-mail: winter.07@mail.ru

**Винокурова Ирина Михайловна**  
к.т.н, доцент кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета (Российская Федерация)

**Кадырметов Анвар Минирович**  
д.т.н, профессор кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (Российская Федерация)

**Аннотация.** Рассмотрен процесс электрогальванического получения покрытий повышенной толщины с послойным механическим упрочнением. Приведен режим осаждения и схема нанесения покрытия, методика исследования и результаты рентгенографического анализа внутренних напряжений.

**Ключевые слова:** ПОКРЫТИЕ ПОВЫШЕННОЙ ТОЛЩИНЫ С ПОСЛОЙНЫМ МЕХАНИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ, ЭЛЕКТРОКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ, ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

<sup>1</sup>Автор для ведения переписки

**TO THE QUESTION OF STRUCTURAL FEATURES OF IRON COATINGS OF HIGH THICKNESS OBTAINED BY THE ELECTROGALVANIC METHOD WITH MECHANICAL LAYER-LAYER HARDENING**

<sup>1</sup>**Gorozhankina Olga Vladimirovna**  
art. lecturer, Department of Aircraft Engineering, Voronezh State Technical University (Russian Federation)  
e-mail: [winter.07@mail.ru](mailto:winter.07@mail.ru)

**Vinokurova Irina Mikhailovna**  
cand. of Tech. Sc., Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology of Materials, Voronezh State Technical University (Russian Federation)

**Kadyrmetov Anvar Minirovich**  
doctor of Tech. Sc., Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov (Russian Federation)

**Annotation.** The process of electrogalvanic production of coatings of increased thickness with layer-by-layer mechanical hardening is considered. The mode of deposition and the scheme of coating deposition, the research technique and the results of the X-ray analysis of internal stresses are presented.

**Keywords:** COATING OF HIGH THICKNESS WITH LAYER-LAYER MECHANICAL HARDENING, ELECTRIC CRYSTALLIZATION, INTERNAL VOLTAGES

### **1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы**

На данный момент одним из перспективных методов получения покрытий железа повышенной толщины является электрогальванический метод с одновременным механическим воздействием инструментом из минералокерамики на формирующееся покрытие. Он дает возможность использовать при осаждении большие плотности тока, дающие возможность существенного увеличения производительности формирования покрытия. Для предотвращения дендритообразования, вызывающего неравномерность роста покрытия на локальных участках поверхности, целесообразно использование механической активации поверхности, которая разрушает пассивирующую пленку [1]. Так как электрогальваническое осаждение происходит в проточном электролите при непрерывном обновлении рабочего раствора, то это способствует получению более качественного покрытия.

Данный метод разработан относительно недавно, и еще широко не исследован, поэтому печатные работы на эту тему имеются пока в небольшом количестве.

Метод основывается на одновременности формирования и активации покрытия с использованием электрохимических и механических процессов. Для реализации процесса использована установка, обеспечивающая проведение предварительной подготовки поверхности под нанесение покрытия и совмещение операций послойного осаждения и механической активации покрытия с конечной операцией обработки под требуемый размер толщиной до 2 мм. Метод обеспечивает высокую прочность соединения покрытия с основой и характеризуется более высокой производительностью процесса, обеспечиваемой большими, чем при традиционном осаждении.

Отличительной особенностью метода является то, что механическое активирование осаждаемых слоев поверхности осуществляется их выглаживанием в межэлектродном пространстве инструментом-брусом.

Сформированное покрытие характеризуется преимуществами, состоящими в низком проценте примесей водорода и серы, достаточной прочности соединения с основой (200-250 МПа) и слоями с упрочненной структурой. Это обеспечивает требуемые плотность и однородность покрытий из железа с повышенной толщиной до 2 мм.

При электрогальваническом осаждении покрытия характеризуются наличием внутренних напряжения первого рода или технологическими остаточными напряжениями, которые определяют надежность покрытия. Внутренние напряжения являются одной из самых важных характеристик состояния поверхностного слоя.

Причин, вызывающих внутренние напряжения в покрытиях, несколько. Это изменения параметров кристаллической решетки, различные структурные несовершенства, включения и примеси, однородность структуры и т.д. Все эти причины обуславливаются природой и свойствами осаждаемых металлов, а также составом электролита и условиями электролиза.

После обработки в детали также могут образовываться остаточные напряжения. В работе [2] подробно описан механизм образования остаточных напряжений, а также методы их выявления и определения их величины. Классификация остаточных напряжений по глубине залегания и их физической сущности впервые была сформулирована Давиденковым Н.Н. [3-6].

Внутренние напряжения в твердом теле по протяженности силового поля разделяются на макронапряжения (1-го рода), микронапряжения (2-го рода) и напряжения в масштабе нескольких элементарных ячеек (3-го рода). Макронапряжения обусловлены образованием дефектов в процессах электрокристаллизации, что приводит к неоднородностям температурного, силового и материального полей в покрытии, которые в большинстве случаев уравниваются в масштабах всего тела. Микронапряжения обусловлены фазовыми превращениями и вызываемыми ими деформациями металла покрытия, уравниваемыми в масштабах размера зерна. Напряжения в масштабе нескольких элементарных ячеек вызваны точечными дефектами их структуры. Внутренние напряжения при электролитическом осаждении металлов определяются режимом нанесения покрытия, составом электролита и покрытия.

Также величина внутренних напряжений зависит от толщины покрытия. Установлено, что высокие значения внутренних напряжений имеются только в начальные моменты оса-

ждения, и уменьшаются до некоторого постоянного значения по мере роста толщины слоя.

Результатом возникновения внутренних напряжений являются упругие деформации и искажения кристаллической решетки.

Внутренние остаточные напряжения в электролитических покрытиях железа, как правило, растягивающие, их величина и природа определяются условиями электролиза и типом осаждаемых металлов. При величинах растягивающих внутренних напряжений, сопоставимых с адгезионной и когезионной прочностью покрытий, покрытие растрескивается, растет его пористость, снижается защитная способность к коррозии, покрытие отслаивается от основы [7]. Поэтому теоретический и практический интерес представляет изучение причин возникновения внутренних напряжений в электрогальванических покрытиях и способов их снижения.

## 2 Материалы и методы

В качестве объекта исследования было выбрано электрогальваническое покрытие железа повышенной толщины на стали 30, полученное комбинированным способом, сочетающим совместное осаждение и механическую активацию каждого слоя покрытия. В качестве электролита использовался хлористый состав [8, 9]:  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} - 350 \text{ кг/м}^3$ ; регулятор кислотности  $\text{HCl}$  ( $\text{pH} = 1$ ).

В качестве анодов и катодов применялись стальные полые стержни из стали 30.

Покрытия наносили на поверхность цилиндрических полых образцов, изготовленных из сортового проката стали 30 ГОСТ 380-94. Образцы были изготовлены длиной 100 мм, наружным диаметром  $60 \pm 0,2$  мм, внутренним диаметром  $54 \pm 0,2$  мм (рис. 1).

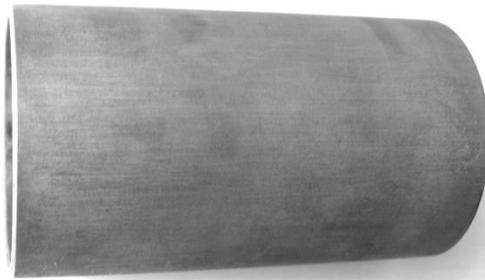


Рисунок 1 – Общий вид образца с наружной поверхностью, подготовленной для электрогальванического осаждения с послойным упрочнением

Исследуемые покрытия получены на специальной установке, которая содержит емкость (электролитическую ячейку), электрод-анод из стали 30 и инструмент, включающий минералокерамическую пластину для активации и пластического деформирования формирующихся слоев покрытия. В ячейку подается проточный электролит. Деталь вращается, при подключении тока начинается процесс осаждения железа на поверхность детали и параллельно с этим поверхность детали выглаживается инструментом из минералокерамики. При этом усилие прижатия инструмента к поверхности покрытия нормированное, инструмент совершает возвратно-поступательные движения. Схема нанесения покрытия показана на рисунке 2.

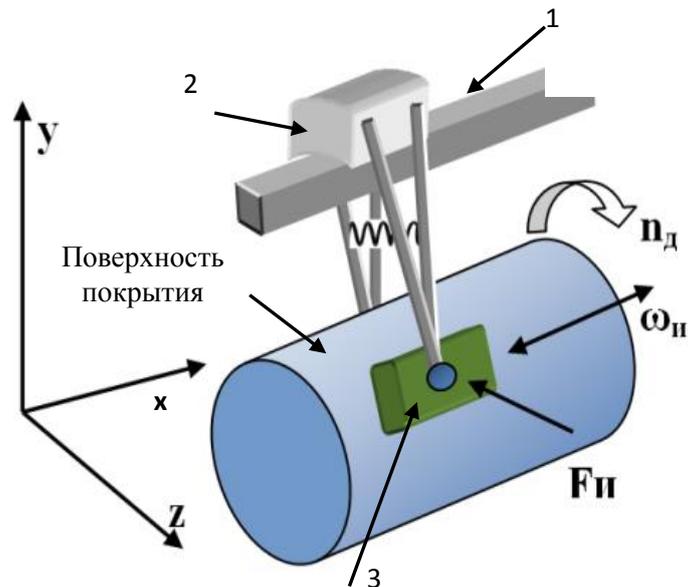
При нанесении покрытия использовались следующие показатели процесса: катодная плотность тока  $i_k = 2500 \text{ А/м}^2$ , параметры электролита: концентрация  $C_{\text{Fe}} = 350 \text{ кг/м}^3$ , температура  $T = 333 \text{ °К}$ , кислотность электролита  $\text{pH} = 1,0$ , время ведения  $t = 6 \text{ ч}$ , окружная скорость вращения детали  $V_0 = 0,2 \text{ м/с}$ , сила прижатия инструмента на восстанавливаемую поверхность  $F = 2 \text{ Н}$  и частота продольного перемещения выглаживающего инструмента  $\omega_n = 40 \text{ мин}^{-1}$ .

Перед основным осаждением применялся разгонный режим:

– сначала на деталь в течение 5 минут подавался постоянный ток, катодная плотность тока составляла  $i_k = 500 \text{ А/м}^2$ ;

– затем увеличивали плотность тока до значений  $2500 \text{ А/м}^2$  в течение 10-15 мин;

– включалось механическая поверхностная обработка поверхности инструментом из минералокерамики.



1 – направляющая; 2 – суппорт; 3 – инструментальная головка,  $n_d$  – скорость вращения детали – 40-60 об/мин;  $\omega_{и}$  – частота перемещений инструмента –  $35-45 \text{ мин}^{-1}$

Рисунок 2 – Схема нанесения покрытия с механическим послойным упрочнением

После получения покрытия от детали отрезались и в дальнейшем исследовались образцы размерами  $22 \times 22 \times 3 \text{ мм}$  (рис. 3).



Рисунок 3 – Вырезанные из макетов деталей шлиф-образцы

Остаточные технологические напряжения в ЭГМ покрытия  $\sigma_{ост}$ , МПа анализировали методом Давиденкова [17-19]. По результатам исследования величина остаточных напряжений составляла приблизительно около 5 МПа. Напряжения на поверхности образца с покрытием исследовали с помощью дифрактометра D2Phaser Bruker.

### 3 Результаты исследований

По результатам рентгенографического анализа рассчитан параметр решетки  $a$ . Эти данные сравнивались с табличными данными параметра решетки  $a$  для  $\alpha$ -железа (табл. 1).

По полученным нами данным видно, что для покрытия значение параметра решетки  $a$

Таблица 1 – Значение параметра решетки  $a$  верхнего слоя покрытия

Режимы нанесения покрытий	Значение параметра решетки, Å
Табличное значение $a$ для железа	2,866
Значение $a$ для покрытия повышенной толщины с механическим послойным упрочнением	2,863

немного меньше табличного, то есть напряжения не растягивающие, а близки к сжимающим, что объясняется значительным уменьшением количества водорода, увеличением плотности слоя и количества дислокаций. Также можно предположить, что внутренние напряжения того же знака будут присутствовать и во всем объеме покрытия.

#### 4 Обсуждение и заключение

По принятой теории в электрогальванических покрытиях существуют растягивающие напряжения, которые тем больше, чем меньше толщина покрытия [20]. С ростом толщины покрытия напряжения уменьшаются. То есть величина напряжений в объеме покрытия повышенной толщины будет неодинакова. Проведенные исследования показали, что в полученном покрытии, за счет выглаживающего механического воздействия на формирующиеся слои покрытия нетокопроводящим инструментом, образуются близкие к сжимающим технологические остаточные внутренние напряжения до 250-300 МПа. Такие напряжения в отличии повышают циклическую долговечность и предел выносливости деталей [10, 11].

При механическом упрочнении (наклепе) поверхностных слоев предел выносливости деталей возрастает [12, 13], что и показывает практический опыт и результаты исследований. В случае электрогальванических покрытий, полученных совместно с механическим воздействием на осаждаемую поверхность, накопление структурных дефектов приводит к накапливающимся деформациям, которые могут в конечном итоге приводить к полезным сжимающим деформациям [14, 15].

Возникшие на подложке кристаллические зародыши постепенно разрастаются до соединения друг с другом и, таким образом, образуется островок. Минералокерамический инструмент, обрабатывая поверхность формирующегося покрытия, одновременно экранирует её от осаждения ионов металла. Этим периодически прерывается рост кристаллов металла, стимулируется рост числа центров кристаллизации и их выход на поверхность дислокаций, что в итоге служит барьером для распространения возможных трещин [14, 15, 16].

Деформированные инструментом слои могут чередоваться по направлению движения инструмента (деформации). То есть, например, один слой будет иметь направление в одну сторону, а следующий слой – в противоположную (рис. 4).

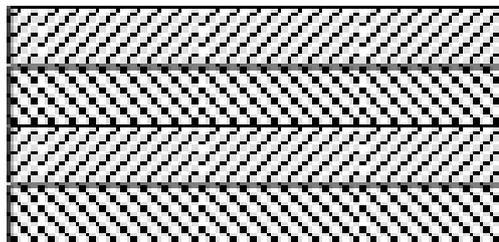


Рисунок 4 – Схема упрочненных слоев в покрытии повышенной толщины с механическим послойным упрочнением

Таким образом, весь объем покрытия будет послойно упрочнен, напряжения будут компенсироваться, а также будут создаваться сжимающие напряжения.

Список литературы

- 1 Захаров, Ю. А. Устройство для гальваномеханического осаждения покрытий на внутренние цилиндрические поверхности деталей автомобилей / Захаров Ю. А., Спицын И. А., Ремзин Е. В., Мусатов Г. А. // Инженерный вестник Дона, № 4 (2014) [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2676](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2676).
- 2 Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1963. – 232 с.
- 3 Ильялов, О. Р. Об определении остаточных напряжений / О. Р. Ильялов, Ю. И. Шяшин. – Пермь : Перм. Политехн. Ин-т, 1988. – 13 с
- 4 Остаточные напряжения : Учебное пособие / Ж. А. Мрочек, С. С. Макаревич, Л. М. Кожуро и др. Под ред. С. С. Макаревича. – Мн. : Технопринт, 2003. – 352 с.
- 5 Подзей, А. В. Технологические остаточные напряжения / А. В. Подзей, А. Н. Сумма, М. И. Евстигнеев ; Под ред. А. В. Подзея. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
- 6 Nair, P. K. Residual stresses of types II and III and their estimation / P. K. Nair, R. Vasudevan // Sadhana. – 1995. – Vol. 20, № 1. – Pp. 39-52.
- 7 Поперека, М. Я. Внутренние напряжения электролитически осажденных металлов. Западно-Сибирское книжное изд-во, Новосибирск, 1966, 335 с.
- 8 Мелков М. П. Электролитическое наращивание деталей машин твердым железом. Саратов : Приволжское книжное изд., 1964 – 204 с.
- 9 Мелков М. П., Швецов А. Н., Мелкова И. М. Восстановление автомобильных деталей твердым железом, 2-е изд. / перераб. и доп. М. : Транспорт, 1982. – 198 с.
- 10 Гурьев, А. В. Об эффективности упрочнения поверхностным пластическим деформированием стальных изделий, работающих с большими перегрузками в условиях малоциклового усталости / А. В. Гурьев, С. Н. Паршев, В. П. Тарасов // Поверхностное упрочнение деталей машин и инструментов. – Куйбышев : КПТИ, 1976. – С. 79-86.
- 11 Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочнённых конструкциях. В. П. Радченко, М. Н. Саушкин. Изд-во М. – «Машиностроение-1», 2005 г., – С. 212.
- 12 Кравченко, Б. А. Формирование остаточных напряжений при термоупрочнении деталей ГТД / Б. А. Кравченко, Г. Н. Гутман, Г. Н. Костина // Проблемы прочности. – 1978. – № 5. – С.12-15.
- 13 Макаров А. В., Сергиев А. П., Журавлев А. В., Макарова Е. В. Деформационное упрочнение поверхностного слоя металла при центробежной абразивной обработке // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 11. – С. 24-26.
- 14 Жачкин, С. Ю. Холодное гальваноконтактное восстановление деталей / С. Ю. Жачкин ; М-во образования Рос. Федерации, Воронеж. гос. техн. ун-т ; Науч. ред. В. П. Смоленцев. – Воронеж : ВГТУ, 2002 – 138 с.
- 15 Чижов М. И., Смоленцев В. П. Гальваномеханическое хромирование деталей машин. Воронеж : ВГТУ, 1998. – 162 с.
- 16 Чижов М. И. Оборудование для гальваномеханического осаждения // Теория и практика машиностроительного оборудования : Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж : ВГТУ, 1996 – С. 126-127.
- 17 Толчеев, А. В. Разработка технологии и установки для толстослойного восстановления деталей осталиванием / дис. канд. техн. наук : 05.03.01/ Толчеев Алексей Владимирович. – Воронеж, 2008. – 170 с.
- 18 Давиденков Н. Н. Избранные труды : В 2-х т. – Том 2. Механические свойства материалов и методы измерения деформаций. – Киев : Наук. думка, 1981. – 656 с.
- 19 Ковенский И. М., Поветкин В. В., Моргун И. Д. Современные методы исследования металлических покрытий. – Тюмень : ТюмИИ, 1989. – 68 с.
- 20 Ваграмян А. Т., Петрова Ю. С. Физико-механические свойства электролитических осадков. – М. : Изд. АН СССР. – 1960. – 206 с.

## References

- 1 Device for galvanomechanical deposition of coatings on the inner cylindrical surfaces of automobile parts Zakharov Yu. A., Spitsyn I. A., Remzin E. V., Musatov G. A. Engineering Bulletin of the Don, № 4 (2014) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2676 Electronic scientific journal "Engineering Bulletin Don ", 2007–2014.
- 2 Birger, I. A. Residual stresses / I. A. Birger. – M. : Mechanical Engineering, 1963. – 232 p.
- 3 Ilyalov, O. R. Determination of residual stresses / O. R. Ilyalov, Yu. I. Shyashin. – Perm : Perm. Polytechnic. Institute, 1988. – 13 p.
- 4 Residual stresses : Textbook / Zh. A. Mrochek, S. S. Makarevich, L. M. Kozhuro et al. 4 Ed. S. S. Makarevich. – Minsk : Tekhnoprint, 2003. – 352 p.
- 5 Podzey, A. V. Technological residual stresses / A. V. Podzey, A. N. Amount, M. I. Evstigneev ; Ed. A. V. Subzey. – M. : Mashinostroenie, 1973. – 216 p.
- 6 Nair, P. K. Residual stresses of types II and III and their estimation / P. K. Nair, R. Vasudevan // Sadhana. – 1995. – Vol. 20, №.1. – Pp. 39-52.
- 7 Across M. Ya. Internal voltages of electrolytically deposited metals. West Siberian book publishing house, Novosibirsk, 1966, – 335 p.
- 8 Melkov M. P. Electrolytic build-up of machine parts with solid iron. Saratov : Volga Book Publishing House, 1964 – 204 p.
- 9 Melkov M. P., Shvetsov A. N., Melkova I. M. Reconstruction of Automotive Parts with Hard Iron, 2nd ed. / revised and add. Moscow : Transport, 1982. – 198 p.
- 10 Guryev A. V. On the efficiency of hardening by surface plastic deformation of steel products operating with large overloads under conditions of low-cycle fatigue / A. V. Guryev, S. N. Parshev, V. P. Tarasov // Surface hardening of machine parts and tools. – Kuibyshev : KPTI, 1976 . – S. 79-86.
- 11 Creep and relaxation of residual stresses in hardened structures. V. P. Radchenko, M. N. Saushkin. Publishing house M. – "Engineering-1", 2005, – p. 212.
- 12 Kravchenko B. A. Formation of residual stresses during thermal hardening of GTE parts / B. A. Kravchenko, G. N. Gutman, G. N. Kostina // Problems of Strength. – 1978. – №. 5. – p. 12-15.
- 13 Makarov A. V., Sergiev A. P., Zhuravlev A. V., Makarova E. V. Strain hardening of the surface layer of metal during centrifugal abrasive processing // Modern science-intensive technologies. – 2014. – №. 11. – P. 24-26.
- 14 Zhachkin S. Yu. Cold galvanic contact restoration of parts / S. Yu. Zhachkin ; Ministry of Education Ros. Federation, Voronezh. state tech. un-t; Sci. ed. V. P. Smolentsev. – Voronezh : VSTU, 2002 – 138 p.
- 15 Chizhov M. I., Smolentsev V. P. Electroplating chromium plating of machine parts. Voronezh : VSTU, 1998. – 162 p.
- 16 Chizhov M. I. Equipment for galvanomechanical deposition // Theory and practice of machine-building equipment : Abstracts. report Int. scientific and technical conf. Voronezh : VSTU, 1996 – pp. 126-127.
- 17 Tolcheev A. V. Development of technology and installation for thick-layer restoration of parts by ostalivanie / dis. Cand. tehn .. sciences : 05.03.01 / Tolcheev Alexey Vladimirovich. – Voronezh, 2008. – 170 p.
- 18 Davidenkov N. N. Selected works : In 2 volumes – Volume 2. Mechanical properties of materials and methods for measuring deformations. – Kiev : Nauk. Dumka, 1981. – 656 p.
- 19 Kovensky I. M., Povetkin V. V., Morgun I. D. Modern research methods for metal coatings. – Tyumen : TyumII, 1989. – 68 p.
- 20 Vahramyan A. T., Petrova Yu. S. Physical and mechanical properties of electrolytic precipitation. – M. : Ed. Academy of Sciences of the USSR. – 1960. – 206 p.