

DOI: 10.34220/2311-8873-2025-3-8



УДК 621.793.74

UDC 621.793.74

2.5.5 – технология и оборудование
механической и физико-технической
обработки

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛА
В ШЕРОХОВАТОМ СЛОЕ
ЭЛЕКТРООСАЖДЕННЫХ
МЕТАЛЛОВ**

Жачкин Сергей Юрьевич,

д.т.н., профессор, доцент кафедры управле-
ния инженерно-авиационным обеспечением
ВВС, ВУНЦ ВВС «ВВА им. Н.Е. Жуков-
ского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж,
e-mail: zhach@list.ru

✉¹ **Трифонов Григорий Игоревич,**

к.т.н., старший научный сотрудник научно-
исследовательского центра (проблем приме-
нения, обеспечения и управления авиацией
ВВС), ВУНЦ ВВС «ВВА им. Н.Е. Жуков-
ского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж,
e-mail: i@gtrifonov.ru

Иванчура Владимир Иванович,

к.в.н., доцент, начальник кафедры управления
инженерно-авиационным обеспечением ВВС,
ВУНЦ ВВС «ВВА им. Н.Е. Жуковского и
Ю.А. Гагарина», г. Воронеж.

Федоров Евгений Владимирович,

к.т.н., доцент, заместитель начальника кафедры
управления инженерно-авиационным обеспе-
чением ВВС, ВУНЦ ВВС «ВВА им. Н.Е. Жу-
ковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж.

Аннотация. В работе проведены исследова-
ния, направленные на выяснение характера
распределения материала в шероховатом
слое. Проанализирован профиль гальваниче-
ского осадка, и на основе сделанных выводов
получено уравнение опорной кривой.
Проведено практическое подтверждение

**DISTRIBUTION OF THE MATERIAL
IN THE ROUGH LAYER OF
ELECTRODEPOSITED METALS**

Zhachkin Sergey Yurievich,

doctor of engineering sciences, professor, associate
professor of the department of management of engi-
neering and aviation support of the Air Force, Mili-
tary Scientific Center of the Air Force "VVA named
after N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin",
Voronezh, e-mail: zhach@list.ru

✉¹ **Trifonov Gregory Igorevich,**

candidate of technical sciences, senior researcher re-
search center (problems of application, support and
management of Air Force aviation), Military Scien-
tific Center of the Air Force "VVA named after N.E.
Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh,
e-mail: i@gtrifonov.ru

Ivanchura Vladimir Ivanovich,

candidate of military sciences, associate profes-
sor, head of the department of management of en-
gineering and aviation support of the Air Force,
Military Scientific Center of the Air Force "VVA
named after N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin",
Voronezh.

Fedorov Evgeny Vladimirovich,

candidate of technical sciences, associate professor,
deputy head of the department of management of en-
gineering and aviation support of the Air Force, Mili-
tary Scientific Center of the Air Force "VVA named
after N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh.

Annotation. The work carried out studies aimed
at clarifying the nature of the distribution of the
material in the rough layer. The profile of the gal-
vanic deposit is analyzed, and based on the con-
clusions drawn, the equation of the reference
curve is obtained. A practical confirmation of the
validity of the obtained theoretical dependencies

справедливости полученных теоретических зависимостей. Измерения проводились на электроосажденных покрытиях меди, цинка и хрома различной толщины.

has been carried out. The measurements were carried out on electrodeposited coatings of copper, zinc and chromium of various thicknesses.

Ключевые слова: ШЕРОХОВАТЫЙ СЛОЙ, ГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ОСАДОК, ОПОРНАЯ КРИВАЯ, ЭЛЕКТРОЛИТ, ТОЛЩИНА ПОКРЫТИЯ.

Keywords: ROUGH LAYER, GALVANIC DEPOSIT, REFERENCE CURVE, ELECTROLYTE, COATING THICKNESS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Изыскание закономерностей, присущих микрорельефу гальванических осадков, имеет определенное практическое и теоретическое значение, поскольку позволяет не только упростить решение методических вопросов оценки степени шероховатости покрытий, которое является весьма актуальными, но и дать некоторые количественные соотношения, связывающие микрогеометрию поверхности детали с условиями осаждения [1].

Отсутствие в настоящее время знаний о характере распределения электролитического осадка по высоте шероховатого слоя при теоретических расчетах заставляет часто прибегать к замене реального профиля покрытия на синусоидальный [2], пилообразный [2, 3] и т. д. Поэтому попытки решить эту задачу [4] не случайны.

Для выяснения характера распределения материала в шероховатом слое рассмотрим картину развития осадка. Средняя толщина покрытия будет зависеть лишь от количества прошедшего электричества. Появление микрогеометрической неоднородности поверхностей электролитических покрытий при осаждении на идеально гладкую основу вызывается рядом влияющих на локальный рост толщины факторов, носящих заведомо статистический характер [5-8]. К их числу относится распределение потенциалов на растущей поверхности осадка, распределение активных и пассивных мест на участках электрода [9, 10] и т. д. Сказанное позволяет отметить, что локальная толщина покрытия h для произвольного направления вдоль основы осадка колеблется около среднего значения, равного толщине покрытия h_0 , и что характер колебаний толщины покрытия должен отвечать одному из законов распределения [8, 10]. Колебания высот осадка около среднего значения говорят о возможности рассмотрения шероховатости как стационарного процесса [8]. Однако вопрос о том, является ли закон распределения материала в шероховатом слое нормальным, требует особой проверки.

При установлении закона распределения высот осадка для шероховатого слоя электроосажденных поверхностей будем исходить из допущения, что этот закон является все же нормальным. Кривая Гаусса, отвечающая этому закону, приведена на рис. 1. Она показывает, какая из локальных высот осадка повторится более или менее часто.

2 Материалы и методы

Очевидно, что наиболее часто встречающейся высотой является средняя толщина покрытия h_0 , совпадающая со средней линией профиля. Высоты же, лежащие выше или ниже h_0 , будут появляться реже, следуя уравнению:

$$y = \frac{1}{H_{ck}\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{h-h_0}{H_{ck}\sqrt{2}}\right)^2}, \quad (1)$$

где y – плотность вероятности высот осадка h , мм. H_{ck} – среднеквадратичное отклонение профиля, мкм.

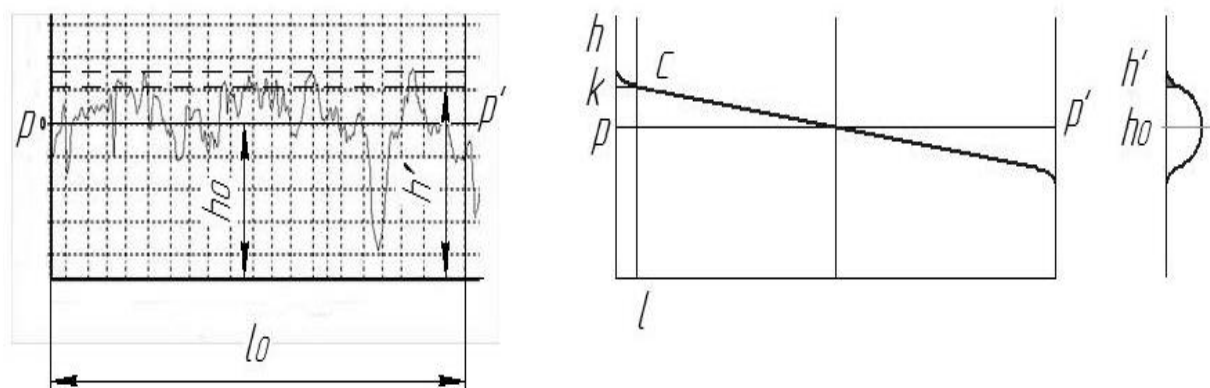


Рисунок 1 – Профиль гальванического осадка и его опорная кривая

Экспериментальное доказательство нормальности распределения металла в шероховатом слое можно осуществить путем проверки формы так называемой опорной кривой поверхностей. Опорная кривая представляет собой зависимость степени заполнения металлом микрорельефа от его высоты h . В случае нормального распределения на любом уровне h опорной кривой ее абсцисса l будет пропорциональна сумме плотностей вероятности всех высот осадка, лежащих выше h [4]:

$$l = \text{const} \frac{1}{H_{ck}\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{h-h_0}{H_{ck}\sqrt{2}}}^{\infty} e^{-\left(\frac{h-h_0}{H_{ck}\sqrt{2}}\right)^2} dh, \quad (2)$$

что геометрически выражается площадью, заштрихованной на рис. 1. На этом основании можно записать:

$$\frac{l}{l_0} = \frac{\frac{1}{H_{ck}\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{h-h_0}{H_{ck}\sqrt{2}}}^{\infty} e^{-\left(\frac{h-h_0}{H_{ck}\sqrt{2}}\right)^2} dh}{\frac{1}{H_{ck}\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{h-h_0}{H_{ck}\sqrt{2}}\right)^2} dh}, \quad (3)$$

где l_0 – длина исследуемого профиля, мм.

Осуществив замену переменных согласно равенству:

$$t = \frac{h - h_0}{H_{ck}\sqrt{2}}, \quad (4)$$

из соотношения (3) получим:

$$\frac{l}{l_0} = \frac{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-t^2} dt}{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-t^2} dt} = \frac{1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-t^2} dt}{2}, \quad (5)$$

и окончательно

$$l = \frac{1}{2} l_0 [1 - \Phi(t)]$$

или

$$l = \frac{1}{2} l_0 \left[1 - \Phi \left(\frac{h - h_0}{H_{\text{ск}} \sqrt{2}} \right) \right], \quad (6)$$

где $\Phi(t)$ – табличный интеграл вероятности, равный

$$\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-u^2} du.$$

Выражение (6) является уравнением опорной кривой. Величина l отражает количество материала, находящегося на уровне профиля, отвечающем высоте h . Значение t практически может быть найдено по таблицам интеграла вероятностей, если известна величина $1 - 2l/l_0$.

3 Результаты исследований

Опытная проверка справедливости соотношения (5) для электроосажденных поверхностей проводилась на различных по толщине и условиям получения осадках меди, цинка и хрома. Степень чистоты исследуемых покрытий соответствовала параметрам $R_a = 0,4 \dots 3,2$ мкм. Когда распределение металла в шероховатом слое отвечает нормальному, график опорной кривой в координатах $(h - h_1) - t$ согласно (6) должен представлять собой прямую линию, где $h - h_1$ – разность между уровнем профиля и высотой h_1 произвольно выбранной линии, проведенной параллельно ему.

На рис. 2 изображены опорные кривые микрогеометрии поверхности в координатах $[(h - h_1); t]$ и $[(h - h_1); l]$, снятые с разных по толщине медных осадков, полученных из сернокислого электролита при нескольких плотностях тока. Линейное расположение экспериментальных точек на графике в координатах $[(h - h_1); t]$ говорит о том, что сделанное предположение о нормальности распределения осадка по микропрофилю поверхности в данном случае справедливо.

К аналогичным результатам приводит анализ профилограмм медных осадков, полученных из всех других кислых сульфатных растворов в диапазоне изменения концентрации $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ от 50 до 250 г/л, серной кислоты – от 20 до 200 г/л при плотностях тока и толщинах осадка, для которых на покрытиях отсутствуют дендритные образования.

4 Обсуждение и заключение

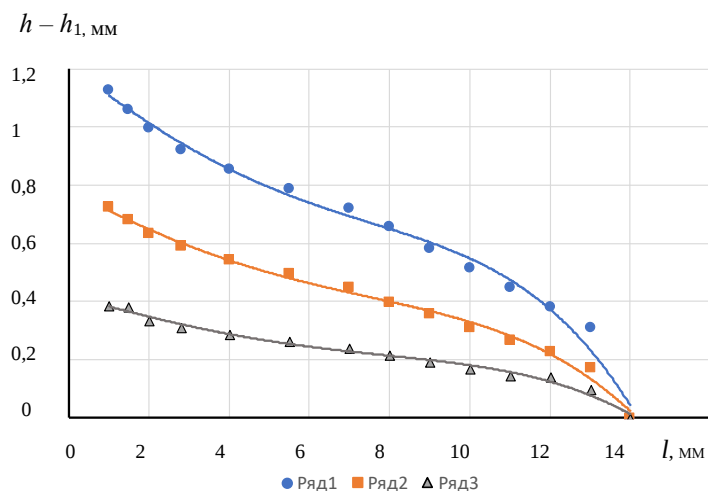
Появление дендритов на осадках приводит к резкому отклонению хода экспериментальных точек от прямой и, следовательно, к отклонению распределения металла в шероховатом слое от нормального.

Необходимо отметить, что построение кривых в координатах $[(h - h_1); t]$ дает возможность просто и точно вычислить основной параметр шероховатости – среднеквадратичное отклонение профиля $H_{\text{ск}}$, а также высоту средней линии h_0 .

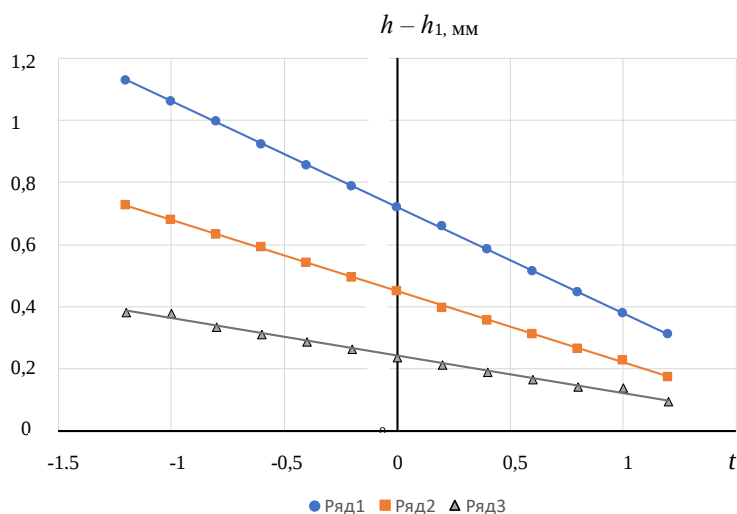
Действительно, из (4) следует, что

$$H_{\text{ск}} = \frac{tg\varphi}{\sqrt{2}},$$

где φ – есть угол наклона прямой на графике $[(h - h_1); t]$. Пересечение прямой с осью $(h - h_1)$ (при $t = 0$) позволяет определить h_0 .



а)



б)

Электролит: 250 г/л $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + 50 г/л H_2SO_4 ;
толщина покрытия: ряд 1 – 90 мкм; ряд 2 – 60 мкм; ряд 3 – 30 мкм

Рисунок 1 – Опорные кривые в координатах $[(h - h_1); l]$ (а) и $[(h - h_1); t]$ (б) для осажденных медных покрытий из электролита

Достаточно большое количество экспериментальных данных, говорит о том, что, как правило, металл в микропрофиле электроосажденной поверхности распределяется нормально. Поэтому электроосажденные поверхности могут быть рассмотрены не только как реализация стационарного, но и как реализация нормального процесса.

Список литературы

- 1 Глузман А.А. В помощь гальванику / А.А. Глузман. – Киев: Техника, 1980. – 30 с.
- 2 Гончаренко К.С. Пористое хромирование деталей машин / К.С. Гончаренко // М.: Машиностроение, 1968. – 192 с.

3 Жачкин С.Ю. Нанесение размерных композитных хромовых покрытий методом гальваноконтактного осаждения / С.Ю. Жачкин // Упрочняющие технологии и покрытия. Машиностроение, 2006. – № 7. – С. 31-38.

4 Жачкин С.Ю. Особенности получения покрытий методом гальваноконтактного осаждения / С.Ю. Жачкин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. – № 3. – С. 22-25.

5 Гриликес С.Л. Электролитические и химические покрытия. Теория и практика / С.Л. Гриликес, К.И. Тихонов // Л: Химия. Ленинградское отделение. 1990. – 288 с.

6 Гурьянов Г.В. Электроосаждение износостойких композиций / Г.В. Гурьянов // Кишинев: Штиинца, 1985. – 238 с.

7 Шоль Н.Р. Применение современных материалов для изготовления и ремонта деталей машин / Н.Р. Шоль, В.Д. Люосев, Л.Я. Иконникова, В.Ю. Прохоров // Ухта: УГТУ, 2004. – 251 с.

8 Применение математических методов для исследования многокомпонентных систем. Сб. под ред. И.Г. Зедгенидзе и др. М.: Металлургия, 1974. – 457 с.

9 Прогрессивное оборудование и технологии для восстановления и упрочнения деталей: Обзор. Информ. / Госагропром СССР. АгроНИИТЭИТО. Сост. И.Г. Голубев, З.Н. Балабанцева. – М., 1989. – 47 с.

10 Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин: учеб. пособие / Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов // Мн.: УП «Технопринт», 2000. – 268 с.

References

1 Gluzman A.A. To help the galvanizer / A.A. Gluzman. - Kyiv: Tekhnika, 1980. - 30 p.

2 Goncharenko K.S. Porous chromium plating of machine parts / K.S. Goncharenko // Moscow: Mashinostroenie, 1968. - 192 p.

3 Zhachkin S.Yu. Application of dimensional composite chrome coatings by galvanic contact deposition / S.Yu. Zhachkin // Strengthening technologies and coatings. Mashinostroenie, 2006. - No. 7. - P. 31-38.

4 Zhachkin S.Yu. Features of obtaining coatings by galvanic contact deposition / S.Yu. Zhachkin // Strengthening technologies and coatings. 2005. – No. 3. – P. 22-25.

5 Grilikhes S.L. Electrolytic and chemical coatings. Theory and practice / S.L. Grilikhes, K.I. Tikhonov // L: Chemistry. Leningrad branch. 1990. – 288 p.

6 Guryanov G.V. Electrodeposition of wear-resistant compositions / G.V. Guryanov // Chisinau: Shtiintsa, 1985. – 238 p.

7 Shol N.R. Application of modern materials for the manufacture and repair of machine parts / N.R. Shol, V.D. Lyuosev, L.Ya. Ikonnikova, V.Yu. Prokhorov // Ukhta: USTU, 2004. – 251 p.

8 Application of mathematical methods for the study of multicomponent systems. Coll. edited by I.G. Zedgenidze et al. Moscow: Metallurgy, 1974. – 457 p.

9 Progressive equipment and technologies for restoration and strengthening of parts: Review. Inform. / State Agro-Industrial Complex of the USSR. AgroNIITEITO. Comp. I.G. Golubev, Z.N. Balabantseva. – Moscow, 1989. – 47 p.

10 Progressive technologies for restoration and strengthening of machine parts: textbook / Zh.A. Mrochek, L.M. Kozhuro, I.P. Filonov // Minsk: UP "Tekhnoprint", 2000. – 268 p.

© Жачкин С. Ю., Трифонов Г. И., Иванчура В. И., Федоров Е. В., 2025