

УДК 621.357.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/27>**Лещенко С.А.**Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**Бровін О.Ю.**Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**Дерібо С.Г.**Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**Мулявка Д.О.**Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОСТАДІЙНОГО ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЧОРНИХ ГІБРИДНИХ КОНВЕРСІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛІ

У роботі проведено дослідження різноманітних процесів одержання конверсійних покриттів на сталевих деталях. Представлено коротку характеристику традиційних вітчизняних процесів, в тому числі термічного оксидування, гарячого лужного оксидування, чорного фосфатування в цинкфосфатних ваннах та формування оксидно-фосфатних плівок із кислих розчинів. Представлено інформацію про деякі сучасні процеси чорного оксидування сталі від провідних зарубіжних виробників переважно на основі відповідних патентів, технічних паспортів і сертифікатів безпеки. Особливу увагу приділено опису процесів одержання чорних гібридних конверсійних покриттів на сталі, а також процесу «холодного оксидування». В результаті проведених експериментальних досліджень було встановлено оптимальні складі робочих розчинів та технологічні режими, що забезпечують формування двостадійного чорного гібридного конверсійного покриття на сталевих виробах. Здійснено підбір компонентів для утворення первинного дикарбоксилатного шару та наступного чорного оксидного покриття, а також визначено температурні умови та тривалість обробки, які забезпечують одержання щільного, однорідного, стійкого до стирання та обсіпання покриття. На першій стадії у розчині, що містить (г/дм<sup>3</sup>): щавлеву кислоту – 15, натрію м-нітробензолсульфонат – 5, калій-натрій виннокислий – 0,5 при 18–25 °С впродовж 5 хв отримують дикарбоксилатне покриття, а на другій стадії у розчині, що містить (г/дм<sup>3</sup>): NaOH – 100, NaNO<sub>3</sub> – 35, NaNO<sub>2</sub> – 5, Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> – 5, SnCl<sub>2</sub> – 0,2, лаурилсульфат натрію – 0,04, при 75–80 °С впродовж 15 хв отримують чорне оксидне покриття. Отримані результати дозволяють реалізувати промислове застосування двостадійного процесу для підвищення антикорозійних і експлуатаційних характеристик сталевих деталей.

**Ключові слова:** конверсійні покриття, чорне гібридне оксидування, дикарбоксилатний шар, холодне оксидування, чорне оксидне покриття, сталеві вироби, антикорозійний захист, робочі розчини, технологічні режими.

**Постановка проблеми.** Конверсійні покриття знайшли широке застосування при обробці чорних металів завдяки поєднанню корозійностійких, функціональних та декоративних властивостей. Вони характеризуються високою адсорбційною здатністю, електроізоляційними та гідрофобними властивостями. Мікропориста структура оксидного шару сприяє утриманню мастил, знижує

коефіцієнт тертя та забезпечує краще припасування мікронерівностей поверхонь тертя. Незначна товщина сформованого шару конверсійного покриття дозволяє застосовувати його для точних деталей без порушення посадкових розмірів. Одержання конверсійних покриттів на сталевих виробах сприяє підвищенню їх експлуатаційних характеристик у машинобудуванні, приладобу-

© Лещенко С.А., Бровін О.Ю., Дерібо С.Г., Мулявка Д.О., 2025  
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

дуванні, інструментальному виробництві та військово-технічній сфері.

Чорні конверсійні покриття займають особливе місце серед різноманітних методів хімічної та електрохімічної обробки поверхні сталевих виробів, оскільки окрім функціональних переваг, вони зменшують відбивну здатність поверхні, формуючи однорідний матово-чорний зовнішній вигляд, що є важливим для оптичних, вимірювальних та тактичних приладів. Комплекс зазначених властивостей зумовлює зростаючий інтерес до технологій чорного оксидування та необхідність удосконалення умов процесу з метою забезпечення відтворюваної якості покриття.

Вдосконалення традиційних технологічних розчинів та впровадження нових інноваційних процесів відбувається з метою універсалізації, зменшення собівартості, вдосконалення і спрощення технологічності процесу, покращення корозійної стійкості, зовнішнього вигляду, функціональних властивостей, відтворюваності результатів. Тому дослідження процесів формування чорних конверсійних покриттів на сталі, впливу складу робочих розчинів та параметрів обробки на структуру й властивості отриманого шару, встановлення оптимальних режимів промислового застосування є актуальним завданням на сьогоднішній день.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** показує, що у вітчизняній практиці найпоширенішими методами одержання чорних конверсійних покриттів на сталях є термічне оксидування, гаряче лужне оксидування, чорне фосфатування в цинкфосфатних ваннах та формування оксидно-фосфатних плівок із кислих розчинів [1–3].

Термічне оксидування, яке проводять на повітрі, в маслах або розплавах солей, потребує підвищених температур (250–470 °C і більше), що робить цей процес енергоємним і небезпечним.

Гаряче лужне оксидування також характеризується високою температурою (125–155 °C) та використанням концентрованих лугів і окисників (NaOH, NaNO<sub>2</sub>, NaNO<sub>3</sub>), що створює ризик хімічних опіків і небезпеку викиду гарячого розчину при контакті з вологою.

Аналіз вітчизняних джерел показує розбіжність між описаними технологіями конверсійних покриттів і сучасними продуктами, що пропонуються на українському ринку; інформація про деякі актуальні процеси у вітчизняній літературі є обмеженою. Лише останнім часом в Україні почали застосовувати методи двостадійного гібридного оксидування [4,5] та «холодного

оксидування» [6], однак нестача відомостей про їх механізми та особливості зумовлює потребу у проведенні їх досліджень.

Провідні американські виробники пропонують в Україні кілька сучасних процесів чорного оксидування сталі.

1. Гаряче оксидування при 140–145 °C (EPi) є аналогом традиційного лужного процесу на основі NaOH, NaNO<sub>2</sub> та NaNO<sub>3</sub>, але містить додатковий компонент – етилендіосечовину [7].

2. Оксидування при 105–115 °C дає змогу уникнути утворення їдкої киплячої пари, покращити безпеку та зменшити енергоспоживання. Процес здійснюється у розчині [8,9], що містить основні солі (NaOH, NaNO<sub>2</sub>, NaNO<sub>3</sub>) і спеціальні добавки – активатори, каталізатори, пенетранти та змочувачі (їх склад не розголошується).

3. Двостадійне гібридне оксидування при 82–88 °C [10–11] або 93–99 °C [12,13] є безпечнішим, оскільки температура нижча за точку кипіння води. Покриття складається з двох шарів: спочатку формується проміжне дикарбоксилатне покриття в розчині щавлевої кислоти, а потім – шар магнетиту Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> у розчині на основі NaOH, NaNO<sub>2</sub>, NaNO<sub>3</sub> з додатковими прискорювачами, ректифікаторами та пенетрантами.

4. «Холодне оксидування» (18–30 °C) є популярним через простоту, хоча процес також двостадійний і за суттю не є оксидуванням: на поверхні формується шар купрум-селеніду. На першій стадії утворюється дикарбоксилатне покриття в розчині щавлевої кислоти (у документації [14] – «активація»). На другій – чорне покриття формується у розчині, що містить сполуку міді, а також селенову, ортофосфатну та нітратну кислоти [15,16]. Основним недоліком методу є висока вартість і токсичність селенових сполук, тому його подальше дослідження було відхилено.

Компанія *Birchwood Laboratories, Inc.* має низку патентів щодо оксидування сталі [4,5,17], термін дії яких завершився, проте наведені в них відомості залишаються цінними.

Патент US 6,695,931 B2 [4] описує формування ультратонкого чорного гібридного конверсійного покриття шляхом послідовного нанесення двох шарів. Спочатку створюють проміжне дикарбоксилатне покриття в розчинах аліфатичних дикарбонових кислот (щавлевої, маленової, бурштинової, винної або їх сумішей) з добавками, що виконують функції рафінувальників зерна або прискорювачів. Це покриття має щільну кристалічну структуру та формує поверхню, багату на молекулярне залізо й кисень. Далі проводять

«фарбування» у нагрітому (50–105 °С) окислювальному розчині  $\text{NaOH-NaNO}_3\text{-NaNO}_2$ , який реагує з проміжним шаром і утворює покриття магнетитом  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Щільність проміжного шару забезпечує отримання дрібнокристалічного та стійкого до стирання кінцевого покриття.

Патент US 6,899,956 B2 [5] описує вдосконалення двостадійного процесу формування хімічного конверсійного покриття на чорних металах. На першому етапі нанесення дикарбоксилатного шару покращено за рахунок введення прискорювача (гідроксиламіну або органічних/неорганічних нітросполук) і змочувального агента. На другому етапі окислення ефект підвищено додаванням хелатора (для пом'якшення води) та прискорювача.

У патенті US 5,723,183 [17] наведено склад і метод створення конверсійного покриття з оксалату або інших дикарбоксилатів заліза з подальшим «фарбуванням» водорозчинним барвником. Спочатку покриття формують у розчині дикарбонової кислоти (щавлевої, малонової, бурштинової, лимонної або винної) з додаванням прискорювача (хлорату, молібдату, сульфїду чи нітросполуки). Потім наносять барвник, який зв'язується з  $\text{Fe(II)}$  у матриці дикарбоксилату, утворюючи водонерозчинний і стабільний пігмент.

Усі зазначені процеси можуть бути інтегровані у виробничі умови, сприяючи зниженню витрат на обробку, скороченню тривалості операцій, а також підвищенню продуктивності та якості продукції. Водночас вибір найбільш економічно доцільного й безпечного технологічного маршруту залишається складним інженерним завданням.

Варто підкреслити, що жоден із технологічних процесів формування конверсійних захисно-декоративних покриттів на сталевих виробках (зокрема оксидування та фосфатування) не забезпечує достатнього рівня корозійного захисту за жорстких або навіть помірних умов експлуатації. У зв'язку з цим на завершальному етапі оброблення необхідним є застосування додаткових захисних заходів – гідрофобізація поверхні в кремнійорганічних рідинах, пасивація у відповідних розчинах або просочення мінеральними чи консистентними мастилами.

Таким чином, саме фінішна стадія обробки визначає кінцевий рівень антикорозійної ефективності та формує зовнішній вигляд покриття. Тип і концентрація використовуваного засобу впливають на оптичні характеристики, товщину захисної плівки, час висихання та корозійну стійкість сформованого покриття.

**Постановка завдання.** Мета дослідження: експериментально визначити оптимальні склади робочих розчинів і технологічні режими, що забезпечують двостадійне формування чорних гібридних конверсійних покриттів на сталевих виробках, та оцінити вплив параметрів процесу на структуру, однорідність, адгезію і експлуатаційні властивості покриття.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Перед нанесенням покриття сталеві деталі піддавалися механічному шліфуванню до забезпечення шорсткості не нижче 7-го класу, хімічному знежиренню в лужному розчині при 60 °С протягом 5–10 хв та хімічному травленню за кімнатної температури протягом 5 хв у розчині складу ( $\text{г/дм}^3$ ):  $\text{HCl}$  – 300–350, інгібітор Pickle Pal – 10 мл/л.

Однорідність покриття, наявність плям, відшарування, великих пор і дефектів оцінювали візуально та під мікроскопом при кратності 50–400×. Адгезію оксидного шару (цілісність та опір відшаруванню) визначали методом перехресних надрізів із подальшим контролем ступеня відшарування відповідно до ISO 2409.

*Дослідження процесу* формування гібридного конверсійного покриття проводили шляхом підбору складу робочих розчинів та режимів процесів для отримання первинного дикарбоксилатного шару та наступного чорного оксидного покриття.

Для формування первинного шару гібридного покриття в якості основного компоненту розчину було випробувано щавлеву, бурштинову, винну кислоти та їх суміші в різних концентраціях. Перший етап окиснення мав забезпечити утворення активної поверхні, що дозволяло застосовувати на наступному етапі менш агресивні розчини з низьким окислювальним потенціалом, зменшивши концентрацію агресивних компонентів, робочу температуру та тривалість обробки.

Очікувалося, що суміш щавлевої і винної кислот сприятиме формуванню більш щільної мікрокристалічної структури, проте практично не вдалося підібрати оптимальне співвідношення компонентів. Найкращі результати було отримано з використанням щавлевої кислоти, однак утворене покриття мало надто крупнокристалічну структуру. Для зменшення розміру кристалів до розчину додавали модифікатори (згідно з рекомендаціями [4]): калій-натрій виннокислий, цитрат, молібдат, триполіфосфат та тїоціанат натрію. Найбільш ефективним виявився калій-натрій виннокислий.

Для прискорення процесу застосовували органічні та неорганічні нітросполуки, а також цитрат,

молібдат, триполіфосфат, тіоціанат, хлорат та сульфід натрію. Позитивний ефект спостерігався при використанні нітробензойної кислоти, особливо – натрію м-нітробензолсульфонату.

В результаті серії експериментів щільне дрібнокристалічне дикарбоксилатне покриття було отримано при температурі 18–25 °С протягом 5 хв у розчині складу (г/дм<sup>3</sup>): щавлева кислота – 15, натрію м-нітробензолсульфонат – 5, калій-натрій виннокислий – 0,5.

Експериментально встановлено, що у разі зниження активності розчину після тривалої експлуатації швидкість процесу можна тимчасово збільшити підвищенням температури до 30–40 °С. Проте більш ефективним заходом є коригування складу розчину шляхом додавання свіжого концентрату до відпрацьованої технологічної ванни.

У процесі експлуатації в розчині утворюється жовтий осад, ідентифікований як оксалат заліза. Наявність осаду незначно впливає на працездатність розчину, проте його рекомендується періодично відфільтрувати.

Після активації деталі слід ретельно промити холодною проточною водою (15–25 °С), а безпосередньо перед наступним етапом обробки – у дистильованій воді, що мінімізує забруднення розчину сторонніми речовинами.

**Підбір розчину для оксидування.** Наступним етапом було визначено задачу отримання щільного, однорідного чорного покриття, стійкого до стирання та обсіпання, при температурі не вище 80 °С. В якості базового розчину було обрано суміш з наступним співвідношенням компонентів (г/дм<sup>3</sup>): NaOH – 100, NaNO<sub>3</sub> – 35, NaNO<sub>2</sub> – 5.

Спочатку проводили експерименти з додаванням різних речовин у ролі прискорювачів та хелаторів.

– Прискорювачі: натрію м-нітробензолсульфонат, нітробензойна кислота, цитрат, молібдат, триполіфосфат, тіоціанат, ванадат, вольфрамат, біхромат, станнат, хлорат, сульфід натрію, хлорид олова(II), хлорид олова(IV) (концентрація 0,05–0,5 г/дм<sup>3</sup>).

– Хелатори металів: тіосульфат, молібдат, сульфід, тіоціанат, глюконат натрію, трилон Б (концентрація 1–10 г/дм<sup>3</sup>).

– Поверхнево-активна речовина (змочувач): лаурилсульфат натрію (0,04–0,1 г/дм<sup>3</sup>).

Найбільш ефективним виявилось додавання 5 г/дм<sup>3</sup> тіосульфату натрію, 5 г/дм<sup>3</sup> молібдату натрію та 0,2 г/дм<sup>3</sup> хлориду олова(II).

Після визначення оптимальних добавок виконано серію експериментів із варіюванням кон-

центрацій основних компонентів у межах (г/дм<sup>3</sup>): NaOH – 25–200, NaNO<sub>3</sub> – 10–70, NaNO<sub>2</sub> – 1–10. Виявлено, що швидкість процесу оксидування значною мірою залежить від вмісту NaOH. Було отримано залежність тривалості чорного оксидування від температури при концентрації NaOH 50–200 г/дм<sup>3</sup>, що наведена на рис. 1.

Аналіз отриманої залежності дозволив зробити висновок про доцільність проведення оксидування при температурі 75–80 °С (оптимально – 80 °С) та вмісті NaOH 100–150 г/дм<sup>3</sup> (оптимально – 100 г/дм<sup>3</sup>).

Експериментальні дослідження [18] підтвердили можливість отримання щільного однорідного чорного покриття, стійкого до стирання та обсіпання, при температурі 75–80 °С протягом 15 хв при використанні розчину складу (г/дм<sup>3</sup>): NaOH – 100, NaNO<sub>3</sub> – 35, NaNO<sub>2</sub> – 5, Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> – 5, SnCl<sub>2</sub> – 0,2, лаурилсульфат натрію – 0,04.

Оскільки захисні властивості оксидних покриттів на сталі є низькими, поверхня після оксидування потребує додаткової обробки для надання антикорозійного ефекту. Серед сучасних методів широко застосовують обробку у водорозчинних антикорозійних засобах, що містять емульгатори та інгібітори корозії, яка може визначатися як гідрофобізація, ущільнення, наповнення або просочення.

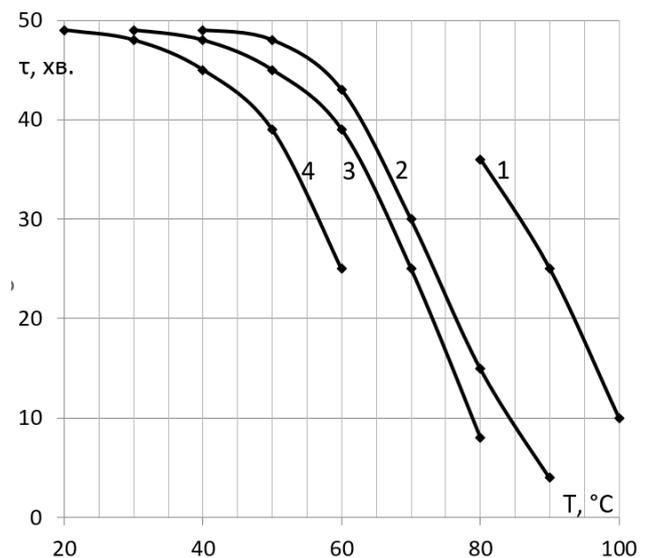


Рис. 1. Залежність тривалості чорного оксидування від температури при вмісті NaOH (г/дм<sup>3</sup>): 1 – 50, 2 – 100, 3 – 150, 4 – 200

У даному дослідженні успішно застосовано антикорозійний засіб *Dri-Touch Amber IRP2*, основу якого складає глибоко гідроочищений важкий нафтовий дистилат із наступним складом (% об.): барій алкілнафталенсульфат – 1–5,

монометилловий ефір пропіленгліколю – 1–5 [19]. Після нанесення на металеву поверхню засіб швидко проникає у поглиблені ділянки, витісняє поверхневу вологу та формує самовідновлювану захисну плівку товщиною близько 2,5 мкм, що забезпечує високу стійкість до атмосферної вологості та корозії.

**Висновки.** В результаті проведених експериментальних досліджень було встановлено оптимальні склади робочих розчинів та технологічні режими, що забезпечують формування двостадій-

ного чорного гібридного конверсійного покриття на сталевих виробках. Здійснено підбір компонентів для утворення первинного дикарбонатного шару та наступного чорного оксидного покриття, а також визначено температурні умови та тривалість обробки, які забезпечують одержання щільного, однорідного, стійкого до стирання та обси- пання покриття. Отримані результати дозволяють реалізувати промислове застосування двостадійного процесу для підвищення антикорозійних і експлуатаційних характеристик сталевих деталей.

### Список літератури:

1. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу : підручник / Л. А. Яцюк, О. В. Косогін, Д. Ю. Ущатовський, О. В. Лінючева, Ю. Ф. Фатєєв; Електронні текстові дані. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. 330 с.
2. Технічна електрохімія. Ч. 3. Гальванічні виробництва : Підручник, видання 2-ге, перероб. й доп. / Г. Я. Якименко, В. М. Артеменко, С. А. Лещенко. Харків : НТУ «ХПІ», 2025. 225 с.
3. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи “Одержання чорних функціональних покриттів на сталях” для студентів спеціальності 161 “Хімічні технології та інженерія” денної та заочної форм навчання / уклад. С. А. Лещенко, В. В. Штефан, Н. О. Кануннікова. Харків : НТУ «ХПІ», 2021. 28 с.
4. United States patent № US 6,695,931 B1. Composition and method for metal coloring process / K. N. Ravenscroft, W. V. Block; Birchwood Laboratories, Inc. Publ. date: 2003. URL: <https://patents.google.com/patent/US6695931B1/en>.
5. United States patent № US 6,899,956 B2. Metal coloring process and solutions therefor / W. V. Block, B. D. Devine; Birchwood Laboratories, Inc. 2005. URL: <https://patents.google.com/patent/US6899956B2/en>.
6. Pat. US-4728365A. Room temperature blackening solution / Paul Jarvi. Mitchell Bradford International Corp. 1988. URL: <https://patents.google.com/patent/US4728365A/en>.
7. Safety Data Sheet. Ultra-Blak 400. URL: <https://www.epi.com/media/1600/ultra-blak-400-0082.pdf>.
8. Kool-Blak 225. Mid Temperature Black Oxide Finish for Steel. Technical Data URL: <https://www.epi.com/media/93814/kool-blak-225.pdf>.
9. Safety Data Sheet. Kool-Blak 225. URL: <https://www.epi.com/media/1614/kool-blak-225-0193.pdf>.
10. Kool-Blak 180. Mid Temperature Black Oxide Finish for Steel. Technical Data. URL: <https://www.epi.com/media/93878/kool-blak-180.pdf>.
11. Kool-Blak 180 CFe. Safety Data Sheet. URL: <https://www.epi.com/media/93875/kool-blak-180-cfe-704.pdf>.
12. Tru Temp MKP/RPL Low Temperature Black Oxide. Operating Instructions. URL: [https://birchwoodtechnologies.com/wp-content/uploads/2019/06/Tru\\_Temp\\_MKP-RPL\\_Instructions.pdf](https://birchwoodtechnologies.com/wp-content/uploads/2019/06/Tru_Temp_MKP-RPL_Instructions.pdf).
13. Safety Data Sheet. Tru Temp MKP. URL: [https://birchwoodtechnologies.com/wp-content/uploads/2019/06/Tru\\_Temp\\_MKP\\_SDS.pdf](https://birchwoodtechnologies.com/wp-content/uploads/2019/06/Tru_Temp_MKP_SDS.pdf).
14. E-Prep 258. Universal Steel Surface Conditioner / Activator. Technical Data. URL: <https://www.epi.com/media/1465/e-prep-258.pdf>.
15. Insta-Blak 333. Room Temperature Blackening for Iron, Steel and Powdered Metals and Architectural Finishes. Technical Data. URL: <https://www.epi.com/media/93407/insta-blak-333.pdf>.
16. Insta-Blak 333. Safety Data Sheet. URL: <https://www.epi.com/media/1266/insta-blak-333-0003.pdf>.
17. Pat. US 5,723,183 A. Metal coloring process / Richard K. Williams, David J. Halverson, James N. Tuttle, Jr. Birchwood Laboratories, Inc.– 1998. URL: <https://patents.google.com/patent/US5723183A/en>.
18. Дослідження процесу двостадійного одержання чорних гібридних конверсійних покриттів / А. В. Колжикова, С. О. Плаксієв, С. А. Лещенко. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXIX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD–2021, 18–20 травня 2021 р.: у 5 ч. Ч. II. Харків : НТУ «ХПІ». С. 167.
19. Dri-Touch IRP30 Plus Rust Preventive. Operating Instructions. URL: [https://birchwoodtechnologies.com/wp-content/uploads/2019/06/Dri-Touch\\_IRP30\\_Instructions.pdf](https://birchwoodtechnologies.com/wp-content/uploads/2019/06/Dri-Touch_IRP30_Instructions.pdf).

**Leshchenko S.A., Brovin O.Yu., Deribo S.G., Muliavka D.O. STUDY OF THE TWO-STAGE FORMATION PROCESS OF BLACK HYBRID CONVERSION COATINGS ON STEEL**

*This work presents a comprehensive study of technological processes for obtaining conversion coatings on steel components. A review of traditional domestic methods was carried out, including thermal oxidation, hot alkaline oxidation, black phosphating in zinc-phosphate baths, and the formation of oxide-phosphate films from acidic solutions. Based on patent materials, technical datasheets, and safety certificates, the characteristics of modern blackening processes for steel are discussed. Particular attention was paid to the formation of black hybrid conversion coatings and the “cold oxidation” method. Experimental studies allowed the determination of optimal compositions of working solutions and technological parameters, ensuring effective two-stage coating formation. Components for the formation of a primary dicarboxylate layer and the subsequent black oxide coating were selected, and the optimal temperature conditions and processing durations were established, providing a dense, uniform coating resistant to wear and flaking. In the first stage of the process, an intermediate dicarboxylate layer is formed in a solution containing (g/l): oxalic acid – 15, sodium m-nitrobenzolsulfonate – 5, potassium-sodium tartrate – 0,5 at 18–25 °C for 5 min. This layer creates an active surface with a dense microcrystalline structure, ensuring effective deposition of the subsequent black oxide coating. In the second stage, oxidation is carried out in a solution containing (g/l): NaOH – 100, NaNO<sub>3</sub> – 35, NaNO<sub>2</sub> – 5, Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> – 5, SnCl<sub>2</sub> – 0,2, sodium lauryl sulfate – 0,04 at 75–80 °C for 15 min, producing a black coating with high corrosion and mechanical resistance. The results demonstrate that the developed two-stage process ensures high uniformity and reliability of the coating, making it suitable for industrial application. This approach enhances the anticorrosive and operational properties of steel components and ensures stability and reproducibility of the technological process in production, which is critical for industrial enterprises with high requirements for surface coating quality.*

**Key words:** conversion coatings, black hybrid oxidation, dicarboxylate layer, cold oxidation, black oxide coating, steel components, anticorrosion protection, working solutions, process parameters.

Дата надходження статті: 22.11.2025

Дата прийняття статті: 11.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025