



УДК 621.795, 621.98.044.7

**А.М. Милюкова, А.В. Алифанов,
О.А. Толкачева, А.А. Лях**

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: annart@mail.ru

Дата поступления 31.05.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛЬНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА КАЧЕСТВО ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация

В статье представлены результаты исследований влияния сильных импульсных электромагнитных полей на поверхность образца из стали 30ХГСА, покрытую хромом. После магнитно-импульсного воздействия гальванические покрытия хромом улучшили адгезию к стальной основе, на структурах исследованных металлических образцов, обработанных после нанесения покрытия, под покрытием виден сплошной измененный слой глубиной 40-90 мкм, в 2 раза снизилась пористость покрытия, увеличилась микротвердость хромового покрытия. Новизна полученных результатов заключается в разработке метода магнитно-импульсной упрочняющей обработки для повышения эксплуатационных характеристик гальванических хромовых покрытий, нанесенных на стальные детали.

Ключевые слова: сталь, гальваническое покрытие хромом, адгезия, пористость, микротвердость, магнитно-импульсная обработка.

Введение

Метод нанесения хромовых покрытий гальваническим методом применяют в производстве почти 100 лет назад и является актуальным и в настоящее время. Гальванические хромовые покрытия сочетают красивый внешний вид с высокой твердостью, износостойкостью и устойчивостью к различным внешним воздействиям. Хром обладает способностью пассивироваться на воздухе в присутствии окислителей, эта особенность обеспечивает долговечность хромовых декоративных покрытий и защиту основного металла от коррозии. Хромирование металлических изделий из алюминиевых и цинковых сплавов, латуни, меди, алюминия, стали подразделяют на коррозионно-стойкие, защитно-декоративные, антифрикционные, износостойкие. Для защиты стальных изделий от коррозии применяются многослойные покрытия: медь, никель, хром (является наружным слоем). Износостойкие и антифрикционные покрытия наносят на инструменты (фрезы, сверла, протяжки, штампы, матрицы, пуансоны и др.) и детали, работающие на трение

(штоки, цилиндры). Слой хрома существенно уменьшает коэффициент трения между сопряженными деталями и уменьшает теплообразование при работе. Наиболее ценные качества хромового покрытия – плохая смачиваемость и химическая инертность хрома. Хромирование применяется также для восстановления размеров, забракованных по размерам и изношенных трущихся деталей при ремонте двигателей внутреннего сгорания. Таким способом восстанавливают цилиндры двигателей, поршневые кольца и пальцы, шейки валов и др. Целесообразность такого восстановления или исправления изделий зависит от степени несоответствия размеров.

Однако существуют у гальванических покрытий хрома ряд недостатков: плохая адгезия, большая толщина, высокая пористость, существенное снижение усталостной прочности изделий.

Разрабатывают специальные режимы электролиза, применяют финишную обработку алмазным выглаживанием или безабразивную ультразвуковую обработку для обеспечения 5 % пористости или беспори-

стых (блестящих) покрытий, надежно защищающих основной металл от морской и атмосферной коррозии. Ряд стальных изделий подвергают комбинированному хромированию, чтобы обеспечить износостойчивость и коррозионную стойкость одновременно. Для улучшения адгезии покрытий тщательно готовят поверхность основы. Толстые гальванические слои хрома наносят на шлифованную и нешлифованную поверхность основы.

Целью настоящей работы является исследование возможности улучшения качества нанесенных гальванических покрытий хрома (улучшение адгезии, устранения высокой пористости, повышение износостойкости) магнитно-импульсной обработкой (МИО) на изделиях из стали марки 30ХГСА, которая применяется для изготовления деталей в авиационной промышленности.

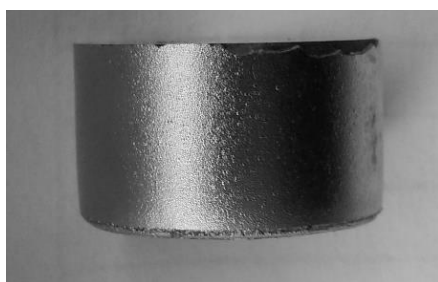
Для МИО использовали разработанную в ФТИ НАН Беларуси высокочастотную магнитно-импульсную установку (генератор импульсных токов) со специальным цилиндрическим индуктором, в котором образуется магнитное поле. В металлическом токопроводящем изделии, помещенном внутрь индуктора, возникают вихревые индукционные токи Фуко. Магнитное поле индукционного тока направлено таким образом, чтобы уменьшить изменение магнитного потока, создаваемого током индуктора. В результате возникает разность плотностей энергии магнитного поля внутри изделия и вблизи поверхности спирали индуктора. Возникают значительные электродинамические силы, создающие большие механические давления, которые в свою очередь способствуют развитию явле-

ния магнитострикции, сильному локальному разогреву, структурно-фазовым превращениям [1–3]. Комплексное воздействие на металлический образец нескольких факторов приводит к изменениям микроструктуры, физических и механических свойств [4]. Основными результатами воздействия на металл по сравнению с известными методами поверхностного упрочнения являются: улучшение шероховатости поверхности; стабилизация макронапряжений на поверхности; при этом неизменяемость геометрических параметров объемного изделия; простота технологии и оснастки; высокая производительность; отсутствие необходимости дополнительных материалов и обработки; низкое энергопотребление; экологическая безопасность.

Учитывая такие возможности данного вида обработки и наличие положительного опыта применения для стального инструмента из различных марок стали [5–8], актуальным стал вопрос возможности использования МИО для улучшения свойств гальванических покрытий хрома.

Основная часть

Для проведения запланированных исследований изготовлены цилиндрические образцы из стали марки 30ХГСА диаметром 20 мм, которые имеют хромовое покрытие толщиной порядка 100 – 200 мкм. Для проведения исследований качества, нанесенного гальваническим методом хромового покрытия использовались образцы предварительно шлифованные (рисунок 1, *а*) и не шлифованные (рисунок 1, *б*). На фотографиях видно отличие в качестве поверхности.



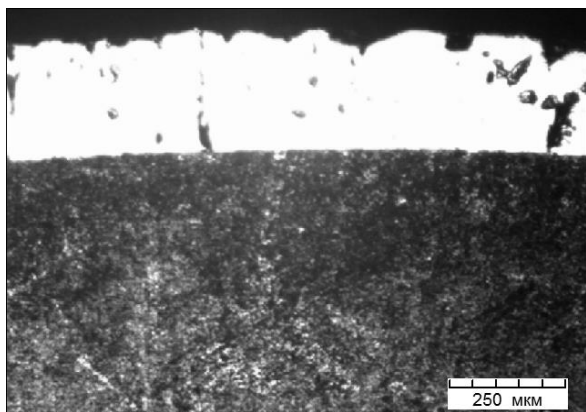
а



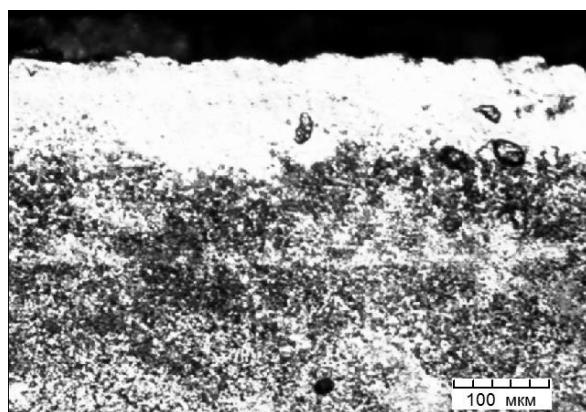
б

Рисунок 1. Образцы из стали марки 30ХГСА:

а – предварительно шлифованная поверхность, *б* – не шлифованная поверхность



а



б

Рисунок 2. Микроструктура хромового покрытия на стали 30ХГСА:

а – шлифованная поверхность стали под покрытием,
б – нешлифованная поверхность стали под покрытием



Рисунок 3. След иглы на поверхности стального образца (без предварительного шлифования) с нанесенным хромовым покрытием

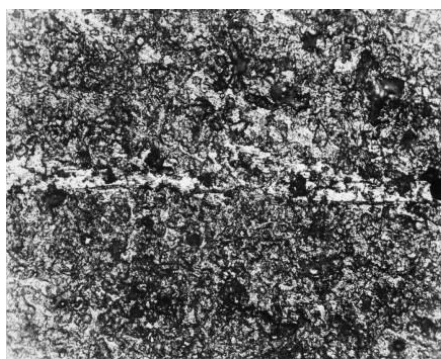


Рисунок 4. След иглы на поверхности стального образца (без предварительного шлифования) с нанесенным хромовым покрытием после МИО

Одним из способов определения адгезии покрытия к подложке является метод иглы (метод царапания), который заключается в нанесении движущейся иглой на поверхность покрытия рисок с возрастающей нагрузкой до тех пор, пока нанесенный слой не отделится от подложки. Исследования адгезии хромовых покрытий к подложке проводили методом царапания на испытательном стенде. В качестве иглы была использована эльборовая пирамида с углом

заточки 136° и радиусом острия $0,02$ мм в диапазоне нагрузок от 10 до 700 г.

На рисунке 2 показана структура поперечного среза предварительно шлифованного (рисунок 2, *а*) и не шлифованного образца стали 30ХГСА (рисунок 2, *б*) с хромовым покрытием, где отчетливо видна разница в характере адгезионных связей.

На рисунке 3 показан след иглы на поверхности стального образца (без предварительного шлифования) с нанесенным

хромовым покрытием. Нагрузка на иглу составила 200 г.

Из рисунка 3 видно, что при испытании характер разрушения покрытия имеет адгезионный характер, т.е. небольшие участки покрытия имеют адгезионный отрыв от поверхности. Это указывает на недостаточную прочность адгезионных связей хромового покрытия и стальной подложки.

Для повышения прочности адгезии покрытий к подложке такие же образцы были подвергнуты магнитно-импульсной обработке с различными технологическими режимами, отличающимися энергией воздействия и количеством импульсов.

На рисунке 4 показан след иглы на поверхности образца из стали 30ХГСА без предварительного шлифования, покрытого хромом и обработанного магнитно-импульсным воздействием с энергией 6 кДж. Нагрузка на иглу составила 200 г.

Из рисунка 4 видно, что адгезия хромового покрытия к стальной подложке значительно улучшилась по сравнению с результатом царапания, представленным на рисунке 3. Это говорит о том, что магнитно-импульсное воздействие активизирует диффузионные процессы между хромовым покрытием и стальной подложкой.

На машине трения исследованы трибологические свойства покрытия, в частности, коэффициент трения стальных образцов с хромовым покрытием. В качестве контртела применялись закаленные диски, изготовленные из стали 40Х.

Коэффициент трения образцов, не подвергнутых магнитно-импульсной обработке, находился в пределах 0,09–0,10; по-

сле МИО – 0,08–0,09. Небольшое уменьшение коэффициента трения произошло, видимо, благодаря повышению плотности покрытия в результате МИО.

Исследование влияния МИО на пористость и микротвердость хромового покрытия, нанесенного на образцы из стали 30ХГСА, провели на двух типах – со шлифованной и не шлифованной поверхностью.

Провели определение пористости хромового покрытия, исследование структуры и измерение микротвердости образцов стали 30ХГСА с маркировками 1-5: 1 – контрольный образец, хром нанесен на шлифованную поверхность стали 30ХГСА; 2 – после МИО с режимом 6 кДж, 4 имп.; 3 – после МИО с режимом 8 кДж, 6 имп.; 4 – контрольный образец, хром нанесен на нешлифованную поверхность стали 30ХГСА; 5 – хром нанесен на нешлифованную поверхность стали после МИО с режимом 6 кДж, 4 имп..

Определение пористости проводили на автоматическом анализаторе изображения "Mini-Magiscan" фирмы "JouyceLoebl" (Англия) по программе "Genias 26". Погрешность метода составляет 3 – 5 относительных процентов. Результаты анализа представлены в таблице 1.

Исследование микроструктуры проводилось на световом микроскопе "MeF-3" фирмы "Reichert" (Австрия) при увеличении $\times 100$ (рисунки 5–9).

Микротвердость измерялась дорожкой от края покрытия к основе на микротвердомере "Micromet-II" с нагрузкой 100 г. по ГОСТ 9450-76.

Таблица 1.

Пористость покрытия на образцах стали 30ХГСА

Маркировка образца	Количество пор (3 участка)	Средняя суммарная площадь, занимаемая порами, $S_{пор}$, мкм ²	Общая анализируемая площадь, $S_{общая}$, мкм ²	Пористость, %
1	145	40,1	167185,9	3,5
2	104	57,5	167185,9	3,5
3	165	136,4	167185,9	13,5
4	155	2,4	167185,9	0,02 (~0,1)
5	21	5,8	133118,3	0,09 (~0,1)

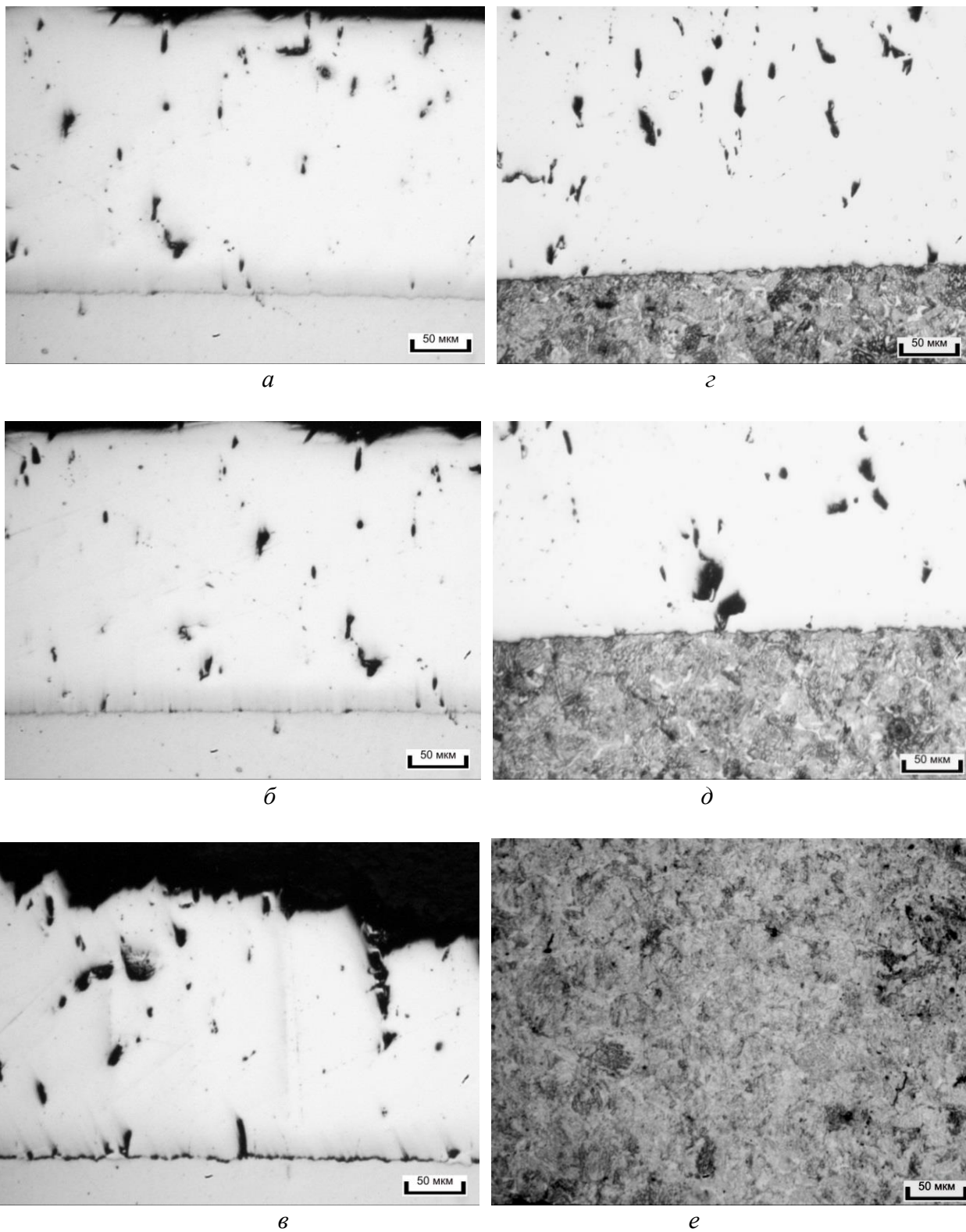


Рисунок 5. Микроструктура контрольного образца стали 30ХГСА с хромовым покрытием с маркировкой 1, x100:
a–в – различные участки пористости покрытия;
г, д – микроструктура стали под покрытием;
е – микроструктура сердцевины стали

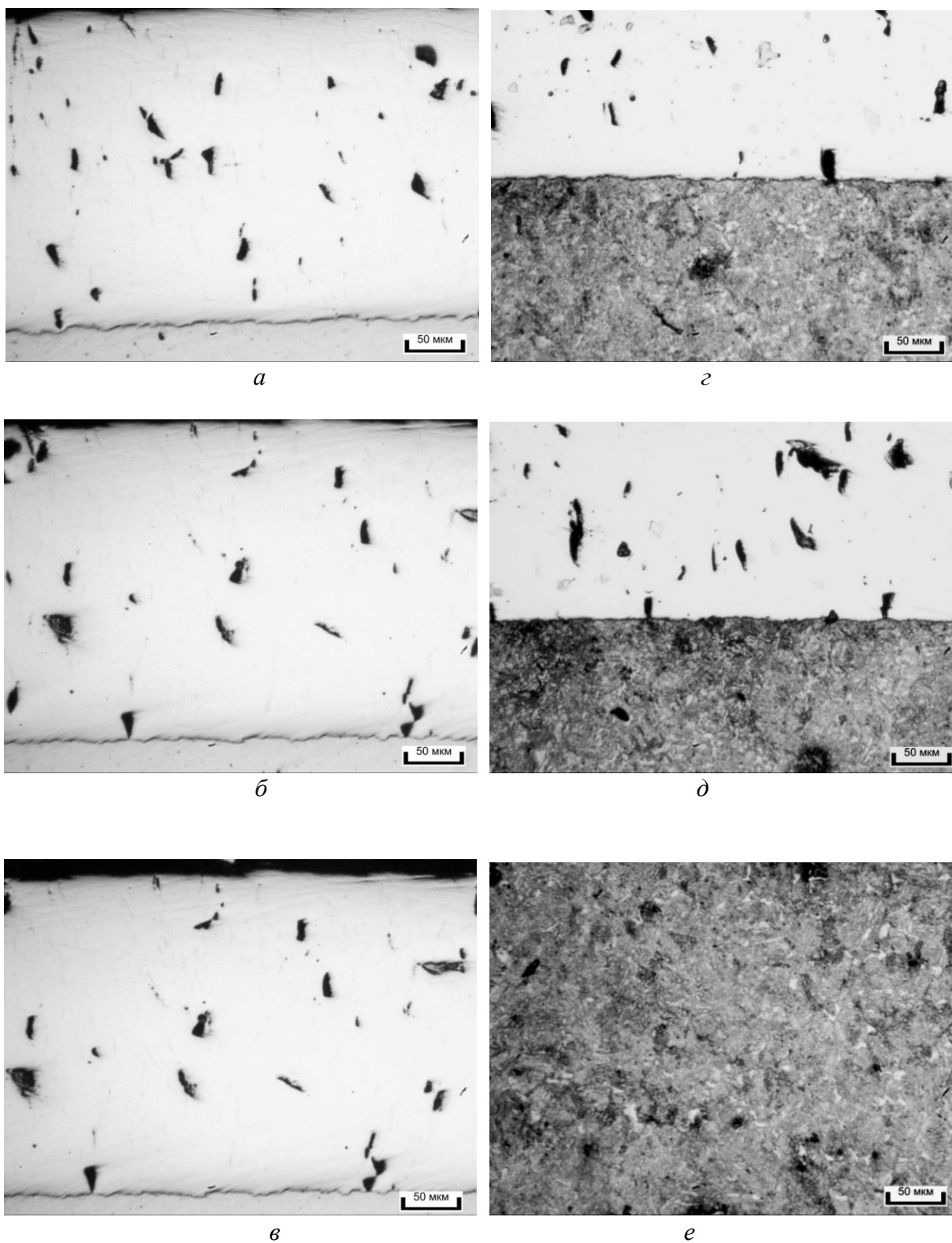


Рисунок 6. Микроструктура образца стали 30ХГСА с хромовым покрытием с маркировкой 2 после МИО (6 кДж, 4 имп.), $\times 100$:
a–в – различные участки покрытия;
г, д – микроструктура стали под покрытием; *е* – микроструктура сердцевины стали

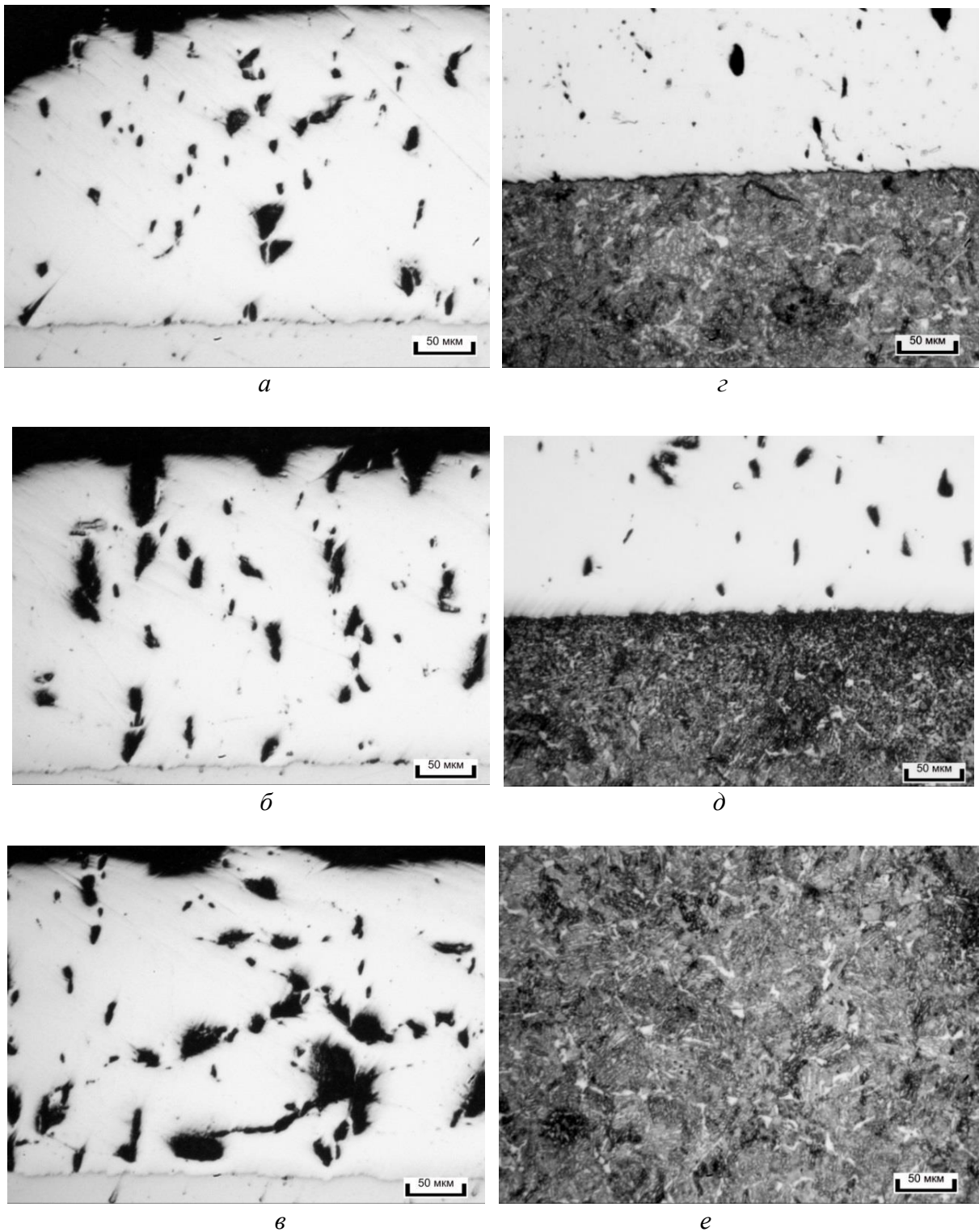


Рисунок 7. Микроструктура образца стали 30ХГСА с хромовым покрытием с маркировкой 3 после МИО (8 кДж, 6 имп.), $\times 100$:
a-в – различные участки пористости покрытия;
г, д – микроструктура стали под покрытием;
е – микроструктура сердцевины стали

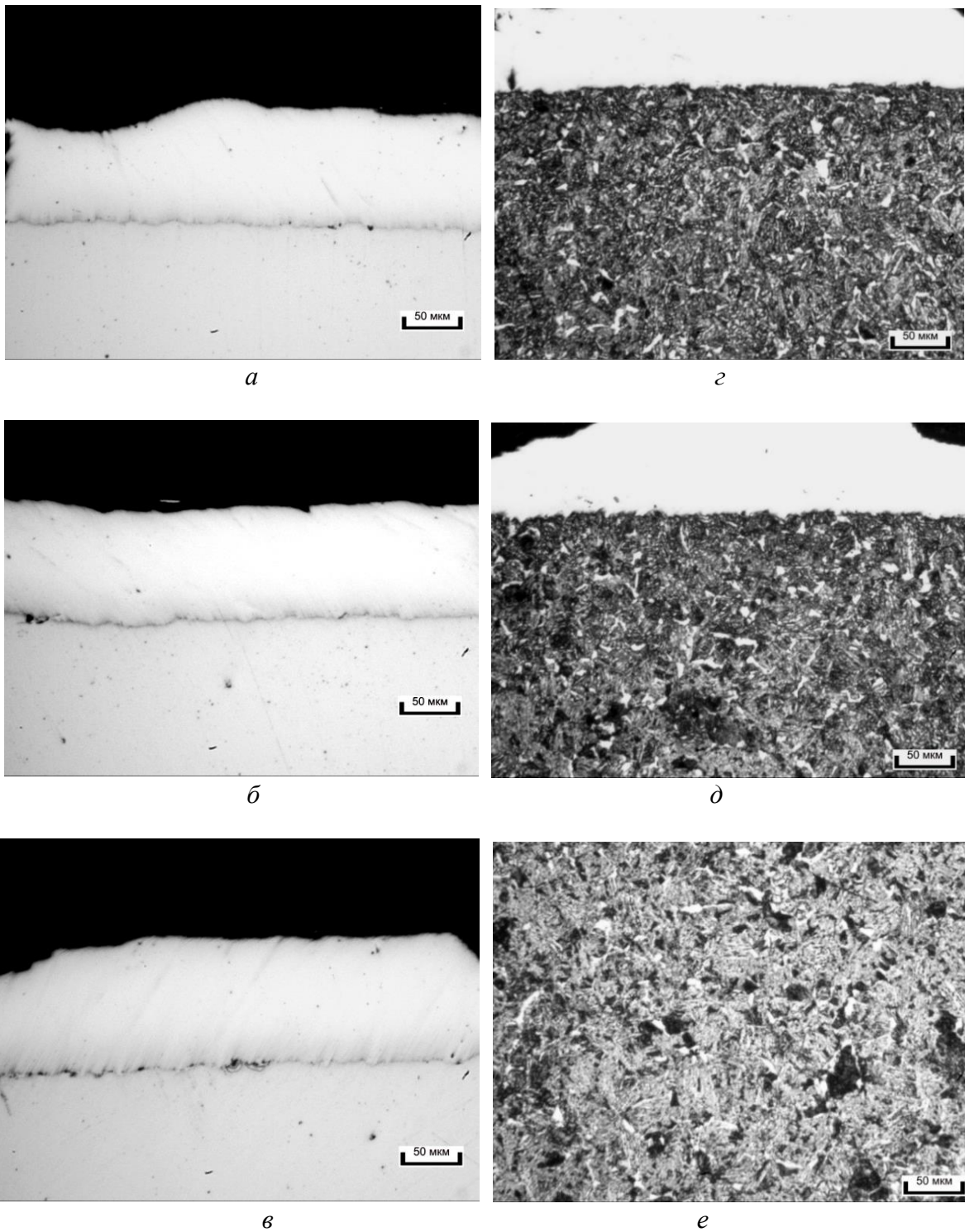


Рисунок 8. Микроструктура контрольного образца стали 30ХГСА с хромовым покрытием с маркировкой 4, $\times 100$:
a–в – различные участки пористости покрытия;
г, д – микроструктура стали под покрытием;
е – микроструктура сердцевины стали

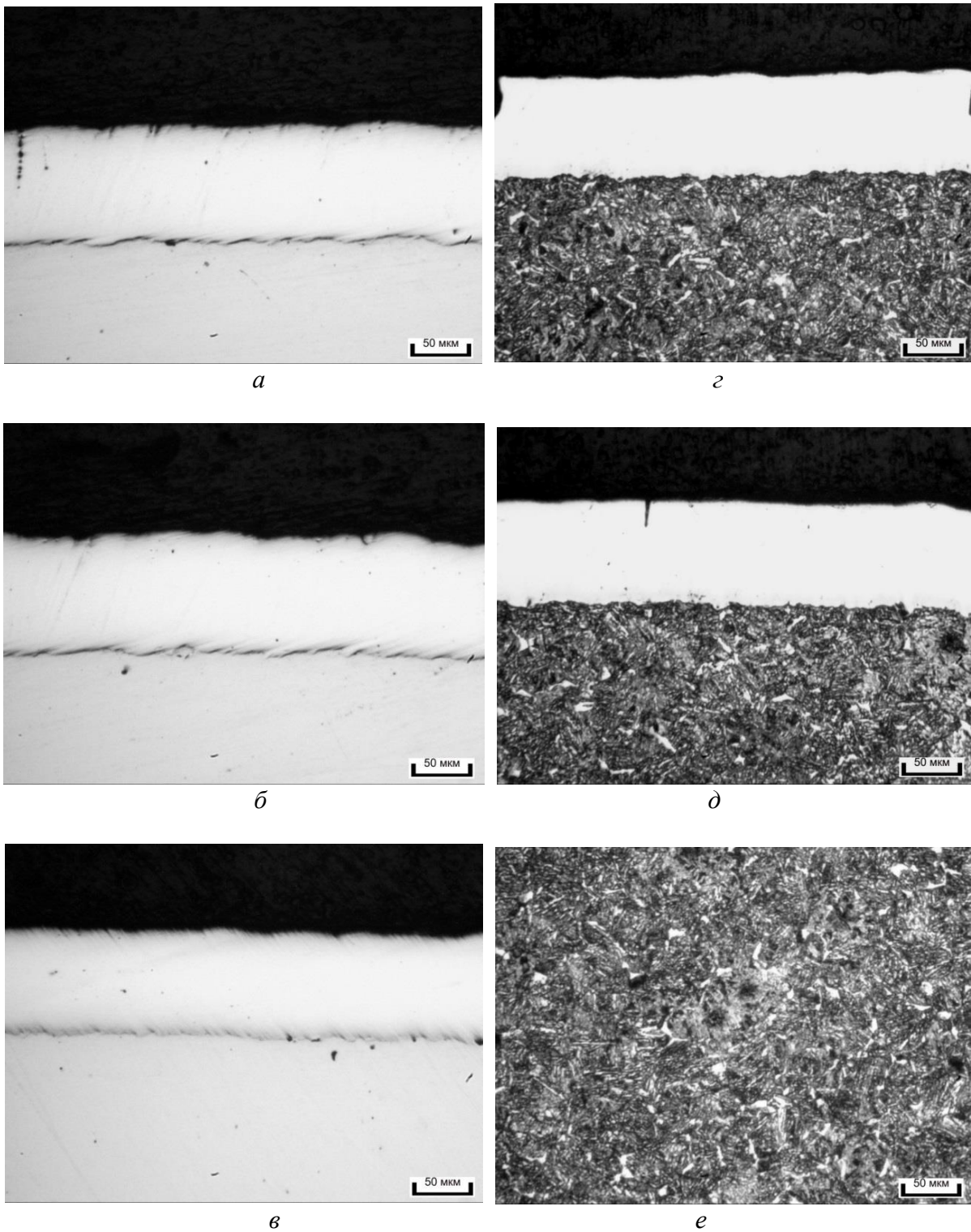


Рисунок 9. Микроструктура контрольного образца стали 30ХГСА с хромовым покрытием с маркировкой 2 после МИО (6 кДж, 4 имп.), x100:
a-в – различные участки пористости Cr –покрытия;
г, д – микроструктура стали под покрытием;
е – микроструктура сердцевины стали

Микроструктура стали 30ХГСА представляет собой феррит, сорбитообразный перлит с твердостью 260 НV. Изменение микротвердости под покрытием относительно сердцевины стали 30ХГСА после МИО не наблюдается, однако на стальном образце под хромовым покрытием образовался модифицированный слой глубиной 40–90 мкм. Средняя твердость хромового покрытия составляет 670 НV.

В результате проведенных исследований пористости покрытия установлено:

- пористость образца с маркировкой 2 после МИО по режиму 6 кДж, 4 имп. не изменяется относительно контрольного образца с маркировкой 1 и составляет в среднем 3,5 %; режим МИО при повышенной энергии 8 кДж и увеличенной длительностью обработки до 6 импульсов (образец 3) приводит к увеличению пористости до 13,5 %, т.е. поры видимо образовались новые

вследствие некачественного покрытия или слились в более крупные;

- хромовые покрытия на образцах с маркировками 1, 2, 3 имеют крупные поры размером порядка 20-30 мкм (образцы 1, 2) и 30-45 мкм (образец 3). Толщина покрытия составляет 250–280 мкм;

- хромовые покрытия на образцах с маркировками 4, 5 имеют мелкие поры размером порядка 1-2 мкм, незначительная пористость не превышает 0,1 %. Толщина хромового покрытия составляет 100-120 мкм.

Микроструктура, твердость хромового покрытия и стали 30ХГСА аналогичны образцам с маркировками 1, 2, 3.

Графики измерения микротвердости хромового покрытия от края поверхности покрытия к стальной основе образцов 30ХГСА до и после МИО представлены на рисунках 10, 11.

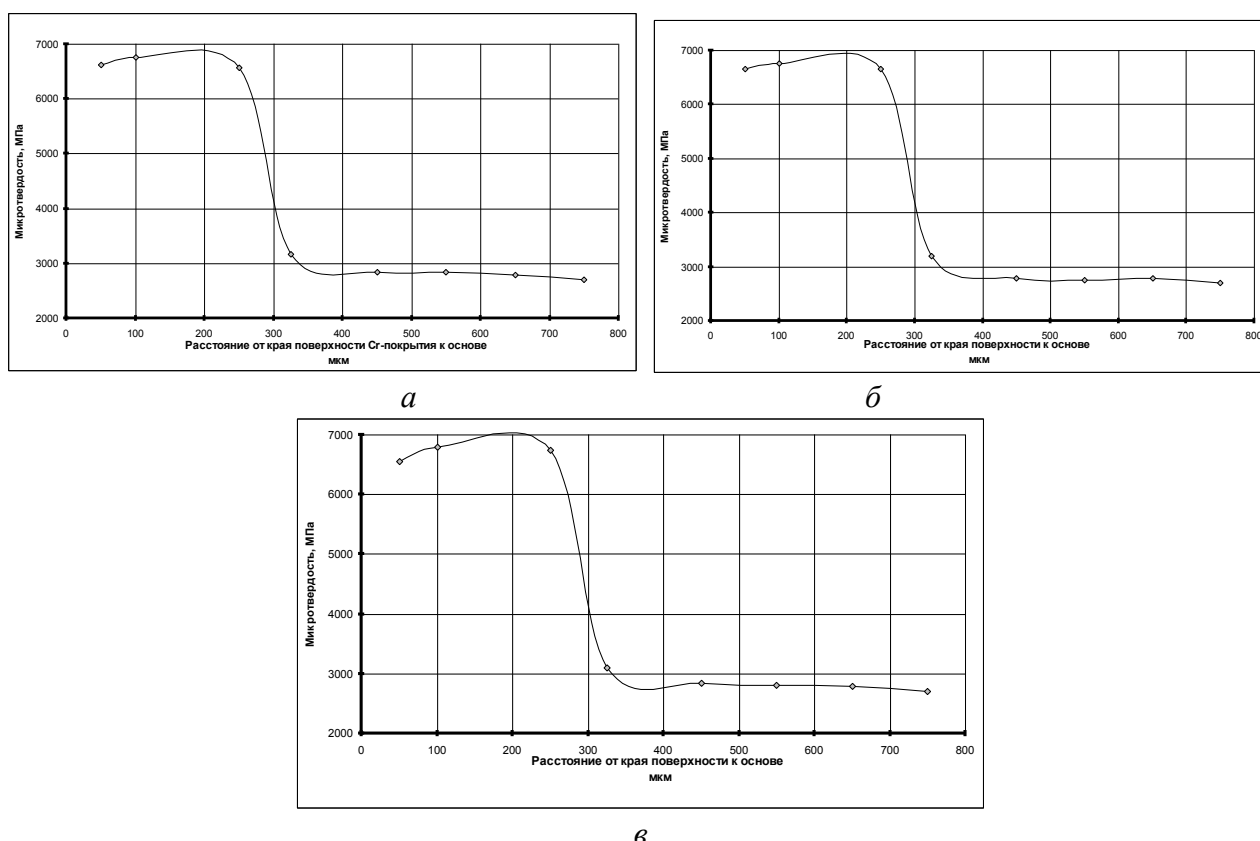


Рисунок 10. Распределение микротвердости от края поверхности Cr-покрытия к стальной основе 30ХГСА:

а – образец с маркировкой 1; б – образец с маркировкой 2; в – образец с маркировкой 3

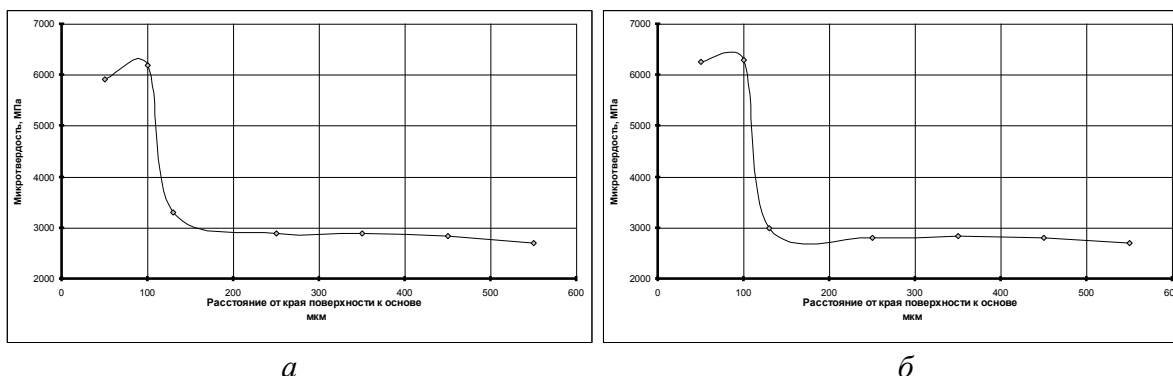


Рисунок 11. Распределение микротвердости от края поверхности хромового покрытия к стальной основе 30ХГСА:
а – образец с маркировкой 1; *б* – образец с маркировкой 2

Анализ полученных результатов показал, что МИО улучшила структурное состояние хромового покрытия с малым количеством пор (до 1 %) и размером пор не более 1-2 мкм, о чем свидетельствует выравнивание микротвердости по толщине покрытия относительно исходного состояния (см. рисунок 11, *а*, *б*).

При наличии крупных пор в хромовом покрытии размером 20-30 мкм происходит увеличение размера пор до 45-50 мкм, что ухудшает качество покрытия за счет повышения его дефектности.

Микротвердость упрочненного слоя примерно в 2 раза выше микротвердости HV основного металла и составляет $\sigma = 2600\text{--}3500$ МПа (основной металл имеет $\sigma = 1300\text{--}1600$ МПа). Микротвердость поверхностного слоя – 4000–4400 МПа, что соответствует твердости закаленной стали 30ХГСА.

Заключение

Обычная пористость хромового покрытия, нанесенного гальваническим способом, с последующей обработкой алмазным выглаживанием или безабразивной ультразвуковой финишной обработкой составляет 5 %. После МИО образцов стали, изготовленных вышеописанным способом, получена пористость 1–2 %. Это подтверждается наличием упрочненного слоя глубиной 40–90 мкм на стальном образце под хромовым покрытием.

Пористая структура в ограниченном интервале значений для деталей, работающих в условиях высоких нагрузок и ограниченной смазки, становится достоинством,

т.к. способствует удержанию смазки.

Микротвердость упрочненного слоя примерно в 2 раза выше микротвердости HV 0,01 основного металла и составляет $\sigma = 2600\text{--}3500$ МПа (основной металл имеет $\sigma = 1300\text{--}1600$ МПа). Микротвердость поверхностного слоя – 4000–4400 МПа, что соответствует твердости закаленной стали 30ХГСА. Микротвердость хромового покрытия соответствует микротвердости молочного хрома. Полученные результаты показывают, что МИО можно при умеренных параметрах применять для упрочнения поверхности стальных изделий, имеющих гальваническое покрытие хромом. Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать продолжить дальнейшие исследования для разработки технологии инновационной упрочняющей МИО с целью повышения качественных характеристик хромовых покрытий.

Библиографический список

1. Б.В. Малыгин Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. М.: Машиностроение, 1989. 112 с.
2. Алифанов А.В., Ционенко Д.А., Милюкова А. М. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Клубовича. Витебск: ВГТУ. 2017. Гл. 13. С. 31–52.
3. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в

- стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милюкова и др. // Весці Нац. акад. Навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2016. № 4. С. 31–36.
4. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка материалов / А. В. Алифанов, А. М. Милюкова, А. Н. Матяс и др. // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 2 кн. Кн. 1. Новые технологии и материалы (редколлегия: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]). Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2021. С. 27–153.
 5. Особенности магнитно-импульсной упрочняющей обработки стальных цилиндрических изделий переменного сечения / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милюкова и др. // Литье и металлургия. 2017. Вып. 2 (87). С. 66–75.
 6. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлорежущих сверл из быстрорежущей стали. / А. М. Милюкова, А. И. Горчанин, А. Н. Матяс, и др. // Вестник БарГУ. Серия Технические науки. 2018. Вып. 9. С. 50–56.
 7. Горчанин А. И., Милюкова А. М., Лях А. А. Повышение эффективности упрочняющей магнитно-импульсной обработки ножей со сложным профилем лезвия // Вестник БарГУ. Серия Технические науки. 2019. Вып. 7. С. 43–48.
 8. Матяс А. Н., Милюкова А. М. Определение эффективности использования упрочняющей магнитно-импульсной обработки для повышения периода стойкости режущего инструмента // Механическое оборудование металлургических заводов. 2020. С. 3–10.

Information about the paper in English

A.M. Milyukova, A.V. Alifanov, O.A. Tolkacheva, A.A. Lyakh
Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: annart@mail.ru
Receipt date: May 31, 2023

UNDERSTANDING THE EFFECT OF STRONG PULSING ELECTROMAGNETIC FIELDS ON THE
QUALITY OF ELECTROPLATED COATINGS

Abstract

This paper describes the results of a study that looked at the effect produced by strong pulsing electromagnetic fields on the chromium-coated surface of a steel 30KhGSA specimen. The magnetic pulse impact helped improve the adhesion of the chromium coating to the steel base. A 40-90 μm deep solid modified layer can be observed underneath the coating when examining the structure of the steel specimens. The coating porosity dropped twice, while the microhardness of the chromium coating increased. The novelty of the obtained results is in the magnetic pulse strengthening treatment that was developed for improving the performance of chromium coatings electroplated on steel parts.

Keywords: Steel, chrome plating, adhesion, porosity, microhardness, pulse-magnetic processing
