

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 535-2:620.193

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).470-480

ГРНТИ 29.31.26+81.33

Специальность ВАК 1.3.8; 2.2.2

Научная статья

ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ NI-CR-MO (NI-CR, NI-MO) СОГЛАСНО УСТАНОВЛЕННОГО КОЛИЧЕСТВА ТОНА В СПЕКТРАЛЬНОЙ ГРУППЕ ОТРАЖЕННОГО СВЕТА

Михайлов Д. Л.^{1, 2}, Ермишкин В. А.², Минина Н. А.², Кулагин С. П.²

¹ООО «Промдеталь» (Великий Новгород, Россия)

²Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН (Москва, Россия)

Аннотация В статье представлен способ оценки коррозионной стойкости однофазных никелевых сплавов систем Ni-Cr-Mo, Ni-Cr, Ni-Mo, имеющих структуру твердого раствора. Исходными параметрами являются данные, полученные в результате проведения анализа тоновых составляющих отраженного видимого света путем расчета длины волны отраженного света. Предлагаемым способом оценивается количество тона в участвующих цветовых группах, где тон – это оттенок или смесь чистых цветов, к которым добавлен чистый серый (равное количество черного и белого). Полученная информация обрабатывается с помощью разработанного программного обеспечения, выполняющего анализ тоновых составляющих. Способ заключается в том, что от фрагмента материала получают и фиксируют отраженный видимый свет. Далее его оценивают по длинам волн, составляя гистограмму нормированного количества тона в участвующих цветовых группах, находящихся в определенном диапазоне длин волн отраженного света. Рассчитанное количество тона в цветовой группе относят на установленное количество пикселей изображения фрагмента, определяя, соответственно, удельное количество тона в цветовой группе. В случае нескольких цветовых групп в отраженном свете определяют преобладающую цветовую группу, где рассчитывают нормированное количество тона. Далее нормированное количество тона в группе относят на общее количество пикселей фрагмента. Большее значение тона, определенное для пикселей фрагмента, характеризует лучшую коррозионную стойкость сравниваемых образцов сплавов. Изображения фрагментов для оценки предлагаются в цифровом формате.

Ключевые слова: коррозионная стойкость, количество тона, отраженный видимый свет, пиксел, длина волны

Для цитирования: Михайлов Д. Л., Ермишкин В. А., Минина Н. А., Кулагин С. П. Экспресс-анализ коррозионной стойкости сплавов системы Ni-Cr-Mo (Ni-Cr, Ni-Mo) согласно установленного количества тона в спектральной группе отраженного света // Вестник НовГУ. 2023. 3(132). 470-480. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).470-480

Research Article

EXPRESS ANALYSIS OF THE CORROSION RESISTANCE OF ALLOYS OF THE NI-CR-MO SYSTEM (NI-CR, NI-MO) ACCORDING TO THE SET AMOUNT OF TONE IN THE REFLECTED-LIGHT SPECTRAL GROUP

Mikhailov D. L.^{1, 2}, Ermishkin V. A.², Minina N. A.², Kulagin S. P.²

¹LLC "PROMDETAL" (Veliky Novgorod, Russia)

²A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russia)

Abstract This article proposes a method for evaluating the corrosion resistance of single-phase nickel alloys of the Ni-Cr-Mo, Ni-Cr, Ni-Mo systems having a solid solution structure. The initial data for evaluating the

corrosion resistance are the data obtained as a result of the analysis of the tone components of the reflected visible light by calculating the wavelength of the reflected light. The proposed method evaluates the amount of tone in the participating color groups, where tone is a hue or mixture of pure colors to which pure gray is added (equal amounts of black and white). The received information is processed using the developed software that performs the analysis of tone components. The method consists in receiving and fixing reflected visible light from a fragment of material. Next, it is evaluated by wavelength, making a histogram of the normalized amount of tone in the participating color groups that are in a certain wavelength range of reflected light. Further, the calculated amount of tone in the color group is related to the set number of pixels of the image of the fragment, determining, respectively, the specific amount of tone in the color group. In the case of several color groups in reflected light, the predominant color group is determined, where the normalized amount of tone is calculated. Next, the normalized amount of tone in the group is related to the total number of pixels in the fragment. A larger tone value determined for the fragment pixels characterizes the best corrosion resistance of the compared alloy samples. Images of fragments for evaluation are offered in digital format.

Keywords: corrosion resistance, tone quantity, reflected visible light, pixel, wavelength

For citation: Mikhailov D. L., Ermishkin V. A., Minina N. A., Kulagin S. P. Express analysis of the corrosion resistance of alloys of the Ni-Cr-Mo system (Ni-Cr, Ni-Mo) according to the set amount of tone in the reflected-light spectral group // Vestnik NovSU. 2023. 3(132). 470-480. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).470-480

Введение

В настоящее время коррозионную стойкость однофазных никелевых сплавов оценивают по скорости убыли массы образца, с помощью стандартных методик (способов кипячения образцов в испытательных растворах) исследований, которые являются затратными и дорогостоящими, как в оборудовании, так и во времени.

Предлагаемый способ оценки коррозионной стойкости никелевых материалов, сплавов систем Ni-Cr-Mo, Ni-Cr, Ni-Mo производится по данным анализа изображений их поверхности в цифровом графическом формате. Способ заключается в том, что получают цифровые изображения фрагментов образцов поверхности материала, далее получают для каждого изображения спектр отраженного видимого света.

Необходимо отметить, что затронутый в статье аспект не был изучен ни отечественными, ни зарубежными исследователями. Оценка коррозионной стойкости производится посредством расчета количества тона в цветовой группе для отраженного видимого света. Этот способ, являясь неразрушающим, обладает новизной и позволяет получить необходимые качественные знания физического состояния поверхности материала в состоянии *in situ*, до и после температурно-временного воздействия, предлагая материалы для анализа и, соответственно, корректировки структурного состояния материала сплава, что является актуальной задачей для сохранения служебных свойств материала сплава.

Коррозионную стойкость материала определяют посредством рассчитанного, нормированного количества тона в цветовой группе спектра, отнесенного на 1 пиксел, как элемента изображения. Удельный показатель количества тона, рассчитанного с помощью программы в координатах «длина волны отраженного видимого света от материала – соответствующее ей количество нормированного

тона», определяет состояние параметра – скорости коррозии, характеризующего эксплуатационную пригодность материала. Техническим результатом изобретения является обеспечение оценки коррозионной стойкости, степени эксплуатационной пригодности материалов.

Исследуемые материалы и методы исследования

Предлагаемый вариант относится к способам неразрушающего контроля и диагностики технического состояния материалов, сплавов на предмет коррозионной стойкости по данным анализа спектра отраженного видимого света от их поверхности, зафиксированных в цифровом коде и анализируемых с помощью разработанной программы. В настоящее время оптическая спектроскопия стала важным источником информации о структурном и энергетическом состоянии поверхности исследуемых материалов.

Ранее были разработаны фотометрические методы анализа спектров яркости отражения видимого света от поверхности исследуемых образцов применительно к оценке структурной повреждаемости их поверхности под действием приложенных механических напряжений и фазовых превращений в сплавах при температурных воздействиях [1, 2], установлена высокая связь отраженной яркости и механических свойств [3]. На основании этого пришли к выводу, что отраженная яркость может служить характеристикой коррозионной стойкости. Но серия опытов заставила усомниться в этом, так как высокой корреляции между отраженной яркостью и коррозионной стойкостью не было установлено.

Авторы настоящей работы предлагают рассмотреть способность поверхности как излучателя отражать видимый свет в сочетании: чем ярче цветовая гамма, тем больше отраженного. В этом случае можно говорить об излучательной способности поверхности к отражению. Это возможно только тогда, когда поверхность более многоцветна (отраженных цветов больше) и цветность рассматривается как доля яркости [4].

Таким образом, делаем вывод, что, чем ярче цвет, тем больше количество белого [4], в случае аддитивного отраженного. Конечно, это характеризует поверхность с различными параметрами энергосостояния. Поэтому можно заключить, что чем ярче аддитивное отраженное, тем больше спектр цветов, тем менее однородно распределена энергия на поверхности.

Авторским коллективом было высказано мнение, что характеристикой физического состояния, в части коррозионной стойкости, может являться чистый цвет, по возможности исключаяющий участие светлого и черного, или допускающий их участие в равных долях, что будет серым цветом. Это и будет наиболее объективной оценкой электронного состояния поверхности. Знание о том, что чем поверхность ярче, тем коррозионная стойкость материала выше, может быть реализовано в частном случае при одновременном выполнении двух условий: когда

отраженная яркость коррелирует с отраженным цветом, который един и чист в спектре и когда участие белого и черного цветов в спектре отраженного видимого света должно быть уравновешено, т. е. должно быть предложено участие чистого серого.

Предлагаемая в настоящей работе оценка коррозионной стойкости тоновой составляющей в цветовой группе становится более универсальной, чем оценка отраженной яркостью. Оценка тоновой составляющей имеет более общий подход, менее избирательна, чем оценка яркостью отраженного видимого света.

Способ реализован в виде программно-аналитического комплекса, который состоит из средств визуализации изображения поверхности материала – сканера, персонального компьютера с разработанной программой для анализа, устройствами для вывода цифровой и графической информации. Все элементы комплекса являются стандартным, серийным, многоцелевым исследовательским оборудованием. Анализ проводился при помощи преобразования изображения из цветового пространства RGB в тоновое пространство HSV. На основе составляющей H пространства HSV вычисляется длина волны отраженного света и производится построение гистограммы длин волн для данного изображения.

Физическая основа предлагаемого способа заключается в оценке фактического распределения энергии по поверхности как однородного распределения энергии [5]. Одинаковость атомарного состояния, соответственно, электронного состояния, прежде всего для валентных электронов [8, 9], предполагает одинаковость отклика электромагнитной волны, чем и является свет. В этом случае инструментом изучения является анализ количества тона в цветовой группе отраженного видимого света изображения поверхности исследуемых объектов, отснятых до воздействия на материал испытательным раствором, позволяющий установить взаимосвязь параметров количества отраженных тоновых составляющих и скорости коррозии.

Поверхности металлических материалов отражают видимый свет. Инструментами в этом случае является химический состав материала и степень шероховатости поверхности. Внешние физические или химические воздействия способны изменять оба эти фактора, обосновывая изменения характеристик отраженного света, для фактического диапазона длин волн.

Результат проведенной оценки коррозионной стойкости материала представлен на графике, построенном разработанной программой по результатам сканирования исследуемой поверхности образца. График представляет собой зависимость в координатах «длина волны отраженного видимого света – соответствующее ей нормированное количество тона в цветовых группах».

Порядок действий для достижения результата (алгоритм, реализованный в программе, по шагам)

- Шаг 1: С помощью сканирующего устройства получены цифровые

изображения фрагментов образцов поверхности материала и по ним для каждого изображения сформирован спектр отраженного видимого света, который предлагается в цифровом коде.

- Шаг 2: Произведен перевод изображения из цветового пространства RGB в тоновое пространство HSV (HSB). По преобразованной цветовой координате определено значение тоновой составляющей, H-тонового пространства HSV.
- По значению тоновой составляющей – H, по формуле определена длина волны отраженного света в нм. Построены гистограммы длин волн для данного изображения. Гистограмма представляет собой зависимость в координатах «длина волны отраженного видимого света (λ)» и соответствующее ей нормированное количество тоновой составляющей) – Q_i , i – это пересчет численных значений длин волн, в нм.
- Шаг 4: Далее по формуле $Q_{color} = \lim \sum Q_i \lambda_i$ была получена интегральная сумма или общее нормированное количества тона в тоновой группе длин волн: a, b), $Q_{color} = (Q_i + Q_{i+1})/2 * (\lambda_i - \lambda_{i+1})$.
- Шаг 5: Далее вычислена $Q_{clp} = \lim \sum Q_i \lambda_i / \text{Sim} (1)$, в диапазоне тоновой группы, длин волн: a, b . Выражение (1) можно записать так: **$Q_{clp} = Q_{color} / \text{Sim}$** (количество установленного нормированного тона на площадь фрагмента), что и будет удельным показателем тона на пиксель.

Удельный показатель **Q_{clp}** и будет качественной мерой, характеризующей коррозионную стойкость. Большее значение этой меры будет подтверждать меньшее значение скорости коррозии для образцов исследуемого материала. Проведенные эксперименты показали высокую корреляцию количества отраженного тона в тоновых группах для различных диапазонов длин волн к внешнему термическому воздействию.

В качестве примера реализации предлагаемого способа оценки коррозионной стойкости металлических материалов рассмотрим вариант с никелевым сплавом X30H60M9 в однофазном состоянии, структуры твердого раствора, системы Ni-Cr-Mo, шифр «Раствор-Н» [6], согласно патенту RU 2613805. Данный материал сплава предлагается в качестве конструкционного, стойкого к окислительным средам. В настоящее время оценку коррозионных свойств материалов данного класса, стойких к окислительным средам, производят согласно ASTM G-28 «А», как стандартной методики. Испытания производят в кипящем испытательном растворе – 50% H_2SO_4 , серной кислоты с добавлением сульфата железа (III), как пассиватора для границ. Показатель скорости коррозии рассчитывается посредством убыли массы в процессе испытания.

Обсуждение результатов.

Были подготовлены 4 плоских образца материала сплава «Раствор-Н». Образцы были термически обработаны по различным режимам при температурах

фазового перехода для структуры твердого раствора. В соответствии с ГОСТ 6038-2017 размеры образцов составили 80x20x5мм, чистота поверхности составила не менее 0,8 мкм. Далее образцы были одномоментно отсканированы, в одинаковых условиях. Это подтверждает объективность исходных данных. По факту изображения были переведены в цифровой, графический формат. После образцы были исследованы по стандартной методике согласно ASTM G-28 метод «А» [7]: кипячение в испытательном растворе (50% H_2SO_4 + $Fe_2(SO_4)_3$) в течение 120 часов, (4 шт.), исполнитель Уральский федеральный университет (г. Екатеринбург, Россия) (таблица 1).

Таблица 1. Скорости коррозии, определенные опытным путем

№ образца	Скорость коррозии образцов, мм/год	Режим термической обработки
4	0,09	1093 °C (15 мин.) + 1135 °C (15 мин.), охлаждение вода
17	0,10	1107 °C (25 мин.), охлаждение вода
15	0,11	1107 °C (25 мин.), охлаждение вода + 800 °C (30 мин.), охлаждение воздух
1	0,12	1121 °C (20 мин.), охлаждение вода + 800 °C (30 мин.), охлаждение воздух

Таблица 2. Расчетные данные

№ образца	Скорость коррозии образцов, мм/год	Расчетные данные по количеству тона на пиксель, Q_{clp}
4	0,09	0,0441
17	0,10	0,038
15	0,11	0,0147
1	0,12	0,0134

Коэффициент корреляции опытных и расчетных данных r составил: - 0,93. Все образцы стойки к МКК (межкристаллическая коррозия). В таблице 2 приведены расчетные данные, полученные с помощью разработанного софта, как удельное количество тоновых составляющих на пиксел изображения, тона были определены для цветовой группы синего цвета.

Ниже представлены графические зависимости, «длина отраженной волны, λ_i , и соответствующее ей количество тона, Q_i » (рисунки 1, 2, 3).

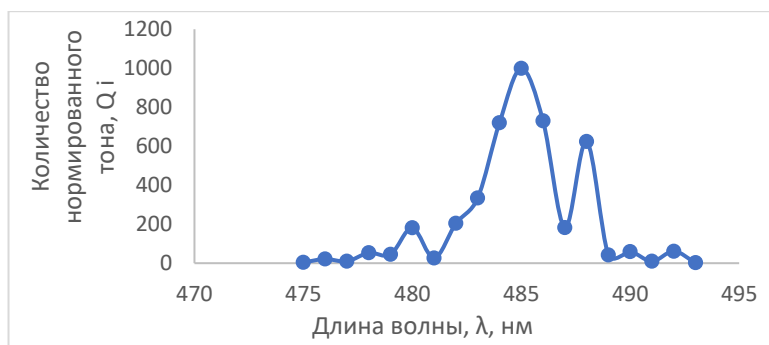


Рисунок 1. Графическая зависимость для образца 4, $Q_{clp} = 0,0441$, $Sim = 312 \times 313$ пкс

Таблица 3. Расчетные данные по количеству отраженного тона для образца 4.

λ_i	q_i	Q_i
493	2	31,5
492	61	35,5
491	10	34,5
490	59	50,5
489	42	333
488	624	403
487	182	456
486	730	864,5
485	999	859,5
484	720	527
483	334	269
482	204	115
481	26	103,5
480	181	113
479	45	49
478	53	31,5
477	10	15,5
476	21	12,5
475	4	$Q_{\Sigma} = 4304$

Примечание: λ_i – длина волны, нм, q_i – значение тоновой составляющей, Q_i – количество отраженного тона в цветовой группе. $Q_{clp} = Q_{\Sigma} / Sim = 0,0441$

Аналогичным способом, с помощью разработанного софта, были рассчитаны значения Q_{clp} для образцов №№ 17, 15, 1, размер изображения для расчета принят 312×313 пкс для каждого образца (таблица 2).

Используя расчетные и экспериментальные данные (таблица 2), находим зависимость скорости коррозии от количества отраженного тона (рисунок 2):

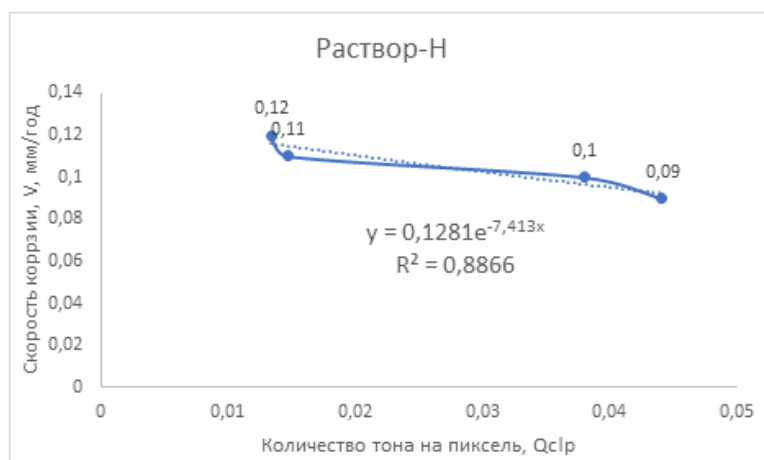


Рисунок 2. Скорость коррозии от количества отраженного тона для образцов №1, 4, 15, 17.

На основании рисунка 2 можно заключить, что предлагаемым способом может быть дана качественная оценка коррозионной стойкости материала сплава [10]. Установлено, что:

$$V \sim e^{-Q_{clp}} , \quad (1)$$

где V – скорость коррозии, Q_{clp} – удельное количество тона в цветовой группе.

В градации большего/меньшего количества отраженного тона, отнесенного на пиксел, можно прогнозировать скорость коррозии в градации меньше / больше, что является удобным способом поиска соответствующего режима термической обработки металлического материала сплава. Предлагаемый способ анализа может найти свое применение для решения технологических задач при входном контроле металла, без проведения затратных процедур оценки коррозионной стойкости, в соответствии со стандартными методиками.

Прикладным вариантом использования предлагаемого способа коррозионной стойкости, повреждаемости может являться его применение аттестационными сварочными центрами для оценки профессионального навыка сварочных специалистов на предмет допуска к работам; монтажа швов стойкой МКК, где требования к зонам термического воздействия сварочного шва высоки (это также подтверждение факта наличия однофазного состояния структуры, структуры твердого раствора как самого шва, так и переходных областей).

Выводы

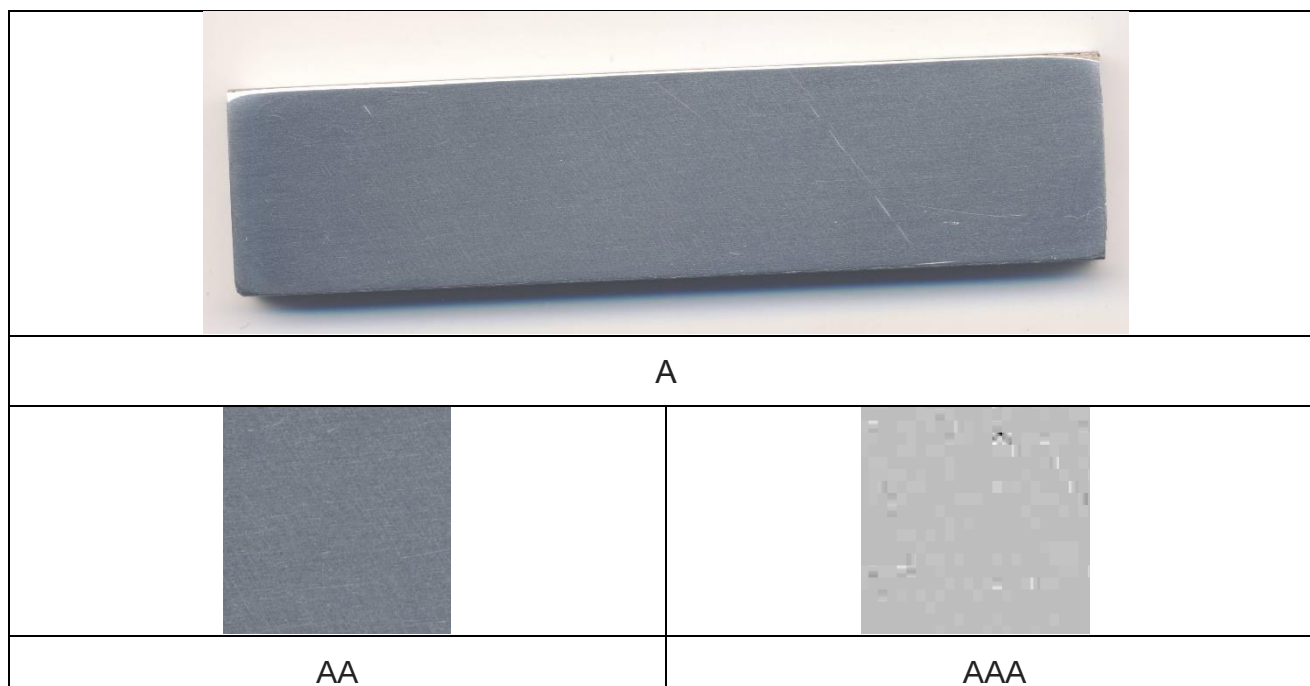
Анализ коррозионной стойкости металлических материалов посредством расчета количества тона в цветовой группе для отраженного видимого света обладает новизной и позволяет получить необходимые качественные знания физического состояния материала без использования стандартных методик (способов кипячения образцов в испытательных растворах) исследований, которые являются затратными и дорогостоящими, как в оборудовании, так и во времени. Установлено, что коррозионная стойкость материала сплава, имеющего структуру твердого раствора, может быть оценена количеством отраженного тона, отнесенного на пиксел изображения, соответственно удельным количеством, плотностью. Таким образом, чем плотности тона в цветовой группе больше, тем сплав является более коррозионностойким для предложенных условий. Эта связь является высокой и математически оценивается показательным образом.

Оценка с помощью предлагаемого способа – это оценка однородности распределения химического состава, соответственно, электронного состояния на поверхности, следовательно, плотности распределения электронных состояний на поверхности. На основании перечисленного можно сделать заключение, что предлагаемый способ является качественной оценкой коррозионной стойкости,

потому что механизм коррозионных разрушений в химических расплавах имеет прежде всего электрохимический характер.

Дополнительный иллюстративный (пояснительный) материал

Имеем скан-изображение (без редактирования) образца в графическом формате.



Пусть изображение в jpg, в RGB цветовом (тоновом) пространстве (см. рисунок A). Разместив изображение в графическом редакторе, вырезаем фрагмент изображения поверхности образца (рисунок AA). Фрагмент должен быть информативным, для чего по возможности необходимо обработать всё изображение поверхности образца. Далее, с помощью разработанного софта, фрагмент переводится программой в HSV пространство, одномоментно идет подсчет количества тоновых составляющих – q_i . Также тоновые составляющие пересчитываются в длины волн λ_i . Тоновое изображение – рисунок AAA.

Список литературы

1. Ермишкин В. А., Лепешкин Ю. Д., Мурат Д. П., Овчинников И. Н. Способ фотометрической диагностики структурного состояния материалов по данным анализа цифрового кодированного изображения их поверхности / Патент № 2387974 Российской Федерации, МПК G01N 21/00 (2006.01), опубл. 27.04.2010. 15 с.
2. Ермишкин В. А., Минина Н. А., Федотова Н. Л. Способ фотометрической диагностики фазовых превращений в твердых телах по данным анализа спектров яркости отражения света от их поверхности / Патент № 2387978 Российской Федерации, МПК G01N 21/55 (2006.01), МПК G01N 25/02 (2006.01). опубл. 27.04.2008. 12 с.
3. Ермишкин В. А., Михайлов Д. Л., Кулагин С. П., Минина Н. А. Влияние термообработки на структуру и свойства хромо-никелевого сплава G-35 // Новые

материалы и перспективные технологии: сборник материалов Четвертого междисциплинарного научного форума с международным участием, 27-30 ноября 2018 г., Москва. Т. 1. Москва, 2018. 648-653. DOI: 10.13140/RG.2.2.25095.04001

4. Briggs D. The difference between chroma and saturation. Munsell color: official website. 2016. URL: <https://munsell.com/color-blog/difference-chroma-saturation/> (Дата обращения: 05.05.23).

5. Оптические свойства и дефектная структура кристаллических тел: обзор: по данным отечественной и зарубежной печати за 1950-1987 гг. / Составители: И. А. Гиндин, Л. А. Чиркина, Э. Н. Метоледи. Москва, ЦНИИатоминформ, 1989. 28 с.

6. Михайлов Д. Л. Коррозионно-стойкий сплав на основе никеле / Патент 2613805 Российской Федерации, МПК C22C 19/05 (2006/01), МПК C22C 30/00 (2006.01). 2017. 10 с.

7. ASTM G28–02. Standard Test Methods for Detecting Susceptibility to Intergranular Corrosion in Wrought, Nickel-Rich, Chromium-Bearing Alloy. ASTM, 2002. 7 p.

8. Rao M. C., Ravindranadh K., Kasturi A., Shekhawat M. S. Structural Stoichiometry and Phase Transitions of MoO₃ Thin Films for Solid State Microbatteries // Research Journal of Recent Sciences. 2013. 2(4). 67-73.

9. Sivakumar R., Gopalakrishnan R., Jayachandran M., Sanjeeviraja C. Characterization on electron beam evaporated alpha-MoO₃ thin films by the influence of substrate temperature // Current Applied Physics. 2007. 7(1). 51-59. DOI: 10.1016/j.cap.2005.10.001

10. Ульянин Е. А., Свистунова Т. В., Левин Ф. Л. Коррозионно-стойкие сплавы на основе железа и никеля. Москва, Металлургия, 1986. 262 с.

References

1. Ermishkin V. A., Lepeshkin Yu. D., Murat D. P., Ovchinnikov I. N. Sposob fotometricheskoy diagnostiki strukturnogo sostoyaniya materialov po dannym analiza tsifrovogo kodirovannogo izobrazheniya ikh poverkhnosti [Method of photometric diagnostics of the structural state of materials based on the analysis of a digitally encoded image of their surface] / Patent RF, no. 2387974. 2010. 15 p.

2. Ermishkin V. A., Minina N. A., Fedotova N. L. Sposob fotometricheskoy diagnostiki fazovykh prevrashcheniy v tverdykh telakh po dannym analiza spektrov yarkosti otrazheniya sveta ot ikh poverkhnosti [Method of photometric diagnostics of phase transformations in solids according to the analysis of the brightness spectra of light reflection from their surface] / Patent RF, no. 2387978. 2008. 12 p.

3. Ermishkin V. A., Mikhailov D. L., Kulagin S. P., Minina N. A. Vliyaniye termoobrabotki na strukturu i svoystva khromo-nikelevogo splava G-35 [The influence of heat treatment on the structure and properties of chromium-nickel alloy G-35] // Novyye materialy i perspektivnyye tekhnologii [New materials and promising technologies]: a collection of materials of the Fourth Interdisciplinary Scientific Forum with international participation, November 27-30, 2018, Moscow. Vol. 1. Moscow, 2018. 648–653. DOI: 10.13140/RG.2.2.25095.04001

4. Briggs D. The difference between chroma and saturation. Munsell color: official website. 2016. Available at: <https://munsell.com/color-blog/difference-chroma-saturation/> (Accessed: 05.05.23).

5. Optical properties and defective structure of crystalline bodies: review: according to the data of the domestic and foreign press for 1950–1987. Comp. by: I. A. Gindin, L. A. Chirkina, E. N. Metolodi. Moscow, Atominform Publ., 1989. 28 p.

6. Mikhailov D. L. Korrozionno-stoykiy spлав na osnove nikelе [Corrosion-resistant nickel-based alloy] / Patent RF, no. 2613805. 2017. 10 p.

7. ASTM G28–02. Standard Test Methods for Detecting Susceptibility to Intergranular Corrosion in Wrought, Nickel-Rich, Chromium-Bearing Alloy. ASTM, 2002. 7 p.

8. Rao M. C., Ravindranadh K., Kasturi A., Shekhawat M. S. Structural Stoichiometry and Phase Transitions of MoO₃ Thin Films for Solid State Microbatteries // Research Journal of Recent Sciences. 2013. 2(4). 67-73.

9. Sivakumar R., Gopalakrishnan R., Jayachandran M., Sanjeeviraja C. Characterization on electron beam evaporated alpha-MoO₃ thin films by the influence of substrate temperature // Current Applied Physics. 2007. 7(1). 51-59. DOI: 10.1016/j.cap.2005.10.001

10. Ulyanin E. A., Svistunova T. V., Levin F. L. Korroziionno-stoykiye splavy na osnove zheleza i nikelya [Corrosion-resistant alloys based on iron and nickel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 262 p.

Информация об авторах

Михайлов Дмитрий Леонидович – директор, ООО «Промдеталь» (Великий Новгород, Россия); соискатель, Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0009-0000-1609-840X, oopromkey@gmail.com

Ермишкин Вячеслав Александрович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9093-8294, vermishkin@imet.ac.ru

Минина Наталья Анатольевна – старший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-3782-3858, minina@imet.ac.ru, minina1951@rambler.ru

Кулагин Сергей Павлович – научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0009-0008-8480-9304, markl@yandex.ru