

Особенности формирования цветного ультраплотного многомерного нанобаркода на поверхности изделий из цветных металлов и их сплавов

УДК 544.537



А. П. Петкова,
профессор кафедры материаловедения
и технологии художественных изделий¹,
докт. техн. наук,
эл. почта: Petkova_AP@pers.spmi.ru



О. Ю. Ганзуленко,
доцент кафедры материаловедения
и технологии художественных изделий¹,
канд. техн. наук,
эл. почта: Ganzulenko_OYu@pers.spmi.ru

¹ Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Известные в настоящее время черно-белые двумерные штрихкоды (2D-коды) небольшой площади широко используют для записи цифровой информации, которую считывают, например, с помощью камеры смартфона [1]. Штрихкоды можно размещать непосредственно на поверхности изделий из различных материалов благодаря развитию технологий нанесения маркировки импульсным лазером [2–4]. Однако один из самых существенных недостатков такого кода — малая информационная емкость. При необходимости увеличения объема информации заметно растут размеры и самих штрихкодов, в том числе двумерных матричных (PDF417, DataMatrix, QR Code и др.) (рис. 1). Соответственно, при большом объеме изделий, имеющих малые габариты, использование таких штрихкодов невозможно [1, 5]. Другим существенным недостатком является отсутствие защиты кода от подделок и возможность его воспроизведения на контрафактной продукции.

В целях защиты информации и увеличения информационной емкости 2D-кода был разработан матричный нанобаркод (НБК) с высокой плотностью записи цифровой закодированной информации непосредственно на поверхности металлических изделий (см. «Цветные металлы». 2022. № 7. С. 93, рис. 2) [5]. Такой двумерный код обеспечивает следующие возможности:

- однозначная аутентификация продукции с помощью криптографической защиты;
- кодирование любой цифровой информации;

В целях защиты изделий от подделки, несанкционированного использования информации, подтверждения подлинности объекта, его однозначной идентификации, увеличения в идентифицирующей символике объема (текстовой, графической, аудио-, видеоинформации и др. медиаданных) примерно 5 раз больше и формирования машиночитаемого шаблона изображения этой символики разработан оригинальный способ формирования цветного матричного кода. Предложенный цветной код позволяет преобразовывать известный черно-белый нанобаркод (НБК) в многомерный цветной, размещаемый на двумерной матрице, или увеличивать емкость НБК в несколько раз.

Результатом применения многомерных цветных матричных кодов является многократное увеличение объема данных, содержащихся в цветном коде, путем размещения всех сформированных слоев двоично-кодированных данных на графической двумерной матрице. Возможно создание кодов в цифровом виде, а также на различных носителях путем печати или лазерной маркировки на металлической поверхности. Определение эталонных цветных ячеек гарантирует считывание и декодирование кода при различиях технических характеристик печатающих и сканирующих устройств. Полученные цветовые палитры и базы данных технологических режимов лазерной маркировки титановых, медных и алюминиевых сплавов обеспечивают воспроизводимость основных цветовых оттенков для всех перечисленных материалов. Использование в цветном матричном коде четырех или восьми цветов вместо только черного и белого в двумерном позволяет увеличить емкость кода до двух или трех бит информации в зависимости от числа цветовых слоев. Оперируя четырьмя или восемью устойчивыми цветовыми оттенками, включая цвет фона, можно формировать двух- и трехслойные цветные матричные коды на поверхности каждого из перечисленных материалов.

Ключевые слова: лазерная маркировка, штрихкод, нанобаркод, цветной матричный код, защита продукции от контрафакта.

DOI: 10.17580/tsm.2023.08.03

- размещение цифровой информации в 5 раз большего объема;
- в 5 раз меньший размер ячейки кода;
- размер кода в 2,5–5 раз меньше, чем у существующих 2D-кодов [6–8].

Уникальность двумерного НБК гарантирована кодированием входной информации генератором случайных чисел, исключая возможность ее прочтения без знания индивидуального ключа кодирования. Предлагаемая технология маркировки обеспечивает успешное считывание нанесенного НБК с увеличением, доступным для современных смартфонов, с последующей расшифровкой с применением оригинального программного обеспечения (ПО) [6–8].

© Петкова А. П., Ганзуленко О. Ю., 2023

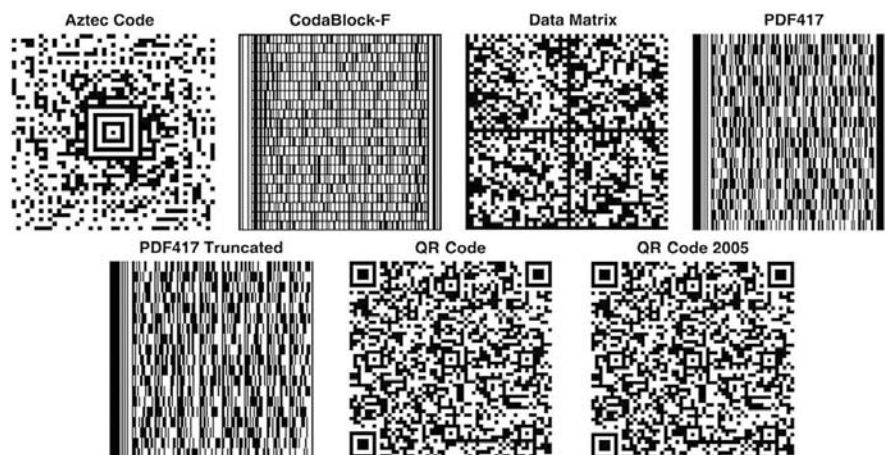


Рис. 1. Двумерные штрихкоды, применяемые для маркировки [1]

Таблица 1
Технологические параметры обработки материалов для нанесения НБК

Параметр	Материал			
	Титан ВТ1-0	Латунь Л 59	Дуралюмин Д16	Медь М1
<i>I</i> , А	18	18	18	18
<i>F</i> , кГц	18–45	50–70	20–40	18–25
<i>V</i> , мм/с	5–25	10–15	5–30	5–15
dpi	508	508	508	508

Материалы и методы исследования

Технологические режимы маркировки НБК обрабатывали на изделиях из медных и титановых сплавов, широко применяемых в машиностроении. Выбор материалов для исследования обусловлен химическим составом и теплофизическими свойствами сплавов, позволяющими формировать цветные оксидные слои при лазерной маркировке [9–11]. Для получения цветных палитр и определения технологических режимов маркировки основных цветовых оттенков выбрали следующие материалы: латунь Л59, медь М1, титановый сплав ВТ1-0 и алюминиевый сплав Д16 [12–14].

Для нанесения НБК непосредственно на металлические поверхности использовали лазерный комплекс «Мини-маркер-20», для формирования и кодирования НБК [7] — специальное ПО, считывали и декодировали НБК с помощью современных смартфонов, расшифровывали с применением предустановленного оригинального ПО [7].

Качество считываемости нанесенных НБК тестировали на образцах из алюминиевых сплавов и латуни с использованием камер смартфонов без увеличения и с увеличением области НБК в 7,5 и в 17 раз: согласно результатам испытаний, полученные НБК считаны успешно. Наличие матовой поверхности снимает необходимость учета угла съемки и освещения [15]. Надежность считывания кодов при диаметре отпечатка 50 мкм у образца из алюминиевого сплава с матовой поверхностью выше, чем у образца из латуни [8, 14].

Оптимальным является нанесение кода на гладкую однотонную матовую поверхность.

НБК имеет свой оригинальный дизайн (см. «Цветные металлы». 2022. № 7. С. 93, рис. 2) [8, 14]. Нужно отметить, что для QR Code и DataMatrix предусмотрено кодирование только текста или изображения малого размера из-за ограничений, вызванных параметрами кода, которые касаются области захвата, моделей используемых сканеров. Высокая плотность записи информации позволяет зашифровать в НБК различные

данные: текстовую, графическую, аудио-, видео- и другую информацию, обеспечивающую защиту от контрафакта и возможность отслеживания изделия на протяжении всего жизненного цикла [6, 7].

В отличие от существующих двумерных QR-кодов и DataMatrix-кодов, для формирования НБК в целях защиты информации от несанкционированного доступа используют симметричное и асимметричное шифрование данных, основанное на многоуровневой системе безопасности, аналогичной современным алгоритмам криптографического шифрования RSA и AES* [5, 16]. Возможность регулировать размер внутреннего квадрата НБК и формировать в нем цветные текстовые записи и рисунки, например логотипы компаний, повышает степень защиты НБК. Выбор возможных цветов может быть задан цветовой палитрой, разработанной для конкретного материала (см. «Цветные металлы». 2022. № 7. С. 94, рис. 3), определяемой технологическими параметрами (табл. 1) его обработки (током накачки диодной линейки, *I*, А; частотой следования импульсов *F*, Гц; скоростью следования импульсов *V*, мм/с; пиксельным разрешением ячейки dpi) [8].

НБК, который наносят импульсным лазером непосредственно на изделие [5, 16], содержит необходимую информацию о продукте: его характеристики, условия изготовления и эксплуатации [5]. НБК не только обеспечивает более эффективную защиту от контрафакта, но и дает возможность отслеживать изделие на протяжении всего жизненного цикла, в том числе анализировать его состав и процесс изготовления для выявления причин преждевременного разрушения.

В процессе лазерной маркировки происходит кратковременное (десятки наносекунд) оплавление поверхности металла, а затем ее окисление, в результате чего

*RSA — образовано от Rivest, Shamir, Adleman (фамилии создателей алгоритма); AES — Advanced Encryption Standard, расширенный стандарт шифрования.

формируются очень тонкие контрастные оксидные пленки [17–19]. За счет образования оксидных структур формируются периодические рельефы, которые изменяют топографию поверхности [20–22]. При нанесении НБК на поверхности металла формируется двумерная матрица контрастных лазерных отпечатков [23–25]. С их помощью можно создавать маркировочные символы, надписи, цветные изображения [26–28]. Цветовая палитра оксидных пленок определяется химическим составом сплавов и их теплофизическими свойствами [29–31]. Для формирования рамок и двумерной матрицы лазерных отпечатков во внутреннем поле двумерного НБК используют только цвета, наиболее близкие к черному. Это обеспечивает воспроизводимость цвета, достаточную контрастность и считываемость (см. «Цветные металлы», 2022. № 7. С. 94, рис. 3) [8]. При помощи цветных изображений и текстовой информации во внутреннем квадрате можно повысить степень защиты, уникальность и узнаваемость НБК.

В целях дальнейшего увеличения объема информации и возможности записи многостраничных документов или графических изображений (конструкторской, технологической документации, аудио- и видеофайлов) предлагается использовать цветные многомерные матричные коды.

Цветные коды относятся к 3D-кодам и, в отличие от 2D-штрихкодов, могут нести любую информацию: текстовые документы, изображения, видеоролики, анимацию. Если черно-белый двумерный QR-код может содержать 3 кб информации, то трехмерный — до 720 кб (рис. 2, а). Вместо ссылки на изображение можно зашифровать картинку целиком, а также небольшие видео- и аудиофрагменты (см. рис. 2, б). Однако не все цветные коды являются трехмерными, цветной штрихкод Microsoft Tag (см. рис. 2, в) относится к двумерным и разработан компанией Microsoft для маркировки своей продукции.

Предлагаемый авторами способ повышения плотности записи информации предусматривает использование цифровых атрибутов цвета как носителей информации, что увеличивает емкость ячейки кода непосредственно за счет цвета. В зависимости от числа используемых цветов цветовой палитры информационная емкость ячейки может колебаться в пределах от 3 до 32 бит. Используя ряды квадратных ячеек, окрашенных в различные цвета, можно повысить плотность кода. Кроме того, используя поле фона как дополнительные ячейки, можно сделать код многомерным.

Обозначим параметр образования слоев для кодирования i , он характеризует наличие или отсутствие базового контрастного цвета, воспроизводимого на материале. Пусть N — число цветовых оттенков, тогда число слоев Y для цветного цифрового НБК можно найти по формуле $N = 2^i$:

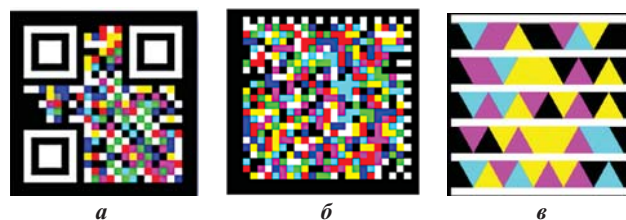


Рис. 2. Примеры трехмерного и двумерного цветных штрихкодов: а — PM-code; б — Color C Code; в — Microsoft Tag

$$\text{при } i = 2 \quad Y = N = 2^2 = 4;$$

$$\text{при } i = 3 \quad Y = N = 2^3 = 8;$$

$$\text{при } i = 4 \quad Y = N = 2^4 = 16;$$

$$\text{при } i = 8 \quad Y = N = 2^8 = 256.$$

Например, используя четыре или восемь цветов только вместо черного и белого цветов, возможно повысить емкость кода до 2 или 3 бит информации соответственно.

Стабильность и воспроизводимость цветовых характеристик наносимых символов достигается за счет определения технологических параметров процесса лазерной маркировки в зависимости от теплофизических свойств маркируемого материала [32–34]. Варьированием соответствующих параметров процесса, таких как ток накачки диодной линейки, частота следования импульсов, скорость следования импульсов и пиксельное разрешение ячейки были найдены базовые палитры для каждого материала (см. «Цветные металлы», 2022. № 7. С. 94, рис. 3).

Полученные авторами в работе [8] цветовые палитры и базы данных технологических режимов лазерной маркировки титановых, медных и алюминиевых сплавов обеспечивают полную воспроизводимость основных цветовых оттенков для каждого из перечисленных материалов [35, 36]. Они позволяют формировать двух- и трехслойные цветные матричные коды. На каждом материале возможно получать от 4 до 8 устойчивых цветовых оттенков, включая цвет фона. Эти цветовые оттенки можно использовать для создания многомерных цветных матричных кодов.

Чтобы гарантировать точное программное считывание цвета, для исследуемых материалов формируют палитры эталонов цветовых оттенков, которые можно использовать в цветном многомерном коде, сформированном таким образом механизм калибровки. Дополнительный механизм калибровки цветовых оттенков позволяет установить диапазон их усреднения с учетом различий при считывании в разных условиях (освещение, угол сканирования и т. д.)

Результаты исследований и их обсуждение

Цветовые слои (палитры) можно использовать, формируя 3D-коды в виде двумерных изображений, при этом информация, размещаемая на слоях, может быть как зависимой, так и независимой (рис. 3).

В предлагаемом многоцветном матричном коде используют преобразование трехмерного объекта в двумерный, позволяющий однозначно идентифицировать объект, защищать содержащуюся в нем информацию с использованием криптографических функций. Представлять информацию в высокоуплотненном виде позволяют следующие факторы:

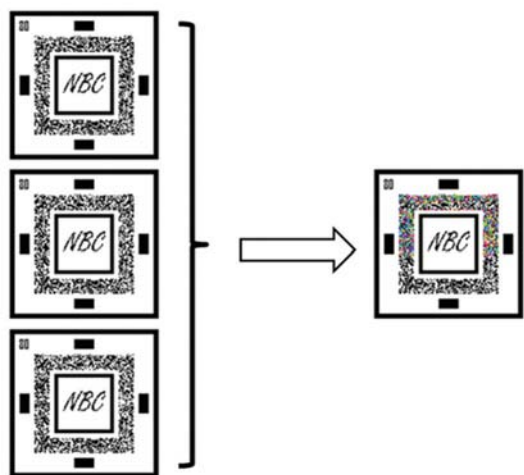


Рис. 3. Семейство из трех слоев двоичных черно-белых данных, преобразуемых в трехмерный цветной НБК

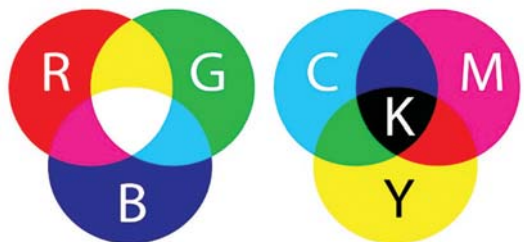


Рис. 4. Цветовые палитры RGB и CMYK [37]

Таблица 2

Распределение по каналам для основных цветов системы RGB

Название цвета	Цвет ячейки	Цвет в RGB	Слой			Бинарное представление
			КРАСНЫЙ	ЗЕЛЕНый	СИНИИ	
Красный (Red)		255.0.0	255	0	0	100
			Белый	Черный	черный	
Зеленый (Green)		0.255.0	0	255	0	010
			Черный	Белый	Черный	
Синий (Blue)		0.0.255	0	0	255	001
			Черный	Черный	Белый	
Белый (White)		255.255.255	255	255	255	111
			Белый	Белый	Белый	
Голубой (Cyan)		0.255.255	0	255	255	011
			Черный	Белый	Белый	
Пурпурный (Magenta)		255.0.255	255	0	255	101
			Белый	Черный	Белый	
Желтый (Yellow)		255.255.0	255	255	0	110
			Белый	Белый	Черный	
Черный (Black)		0.0.0	0	0	0	000
			Черный	Черный	Черный	

- формирование на плоскости матрицы многослойного (трехмерного) цветного изображения кода;
- расположение на матрице семейства слоев двоично-кодированных данных, каждый из которых является независимым и содержит независимую информацию;

– алгоритмы сжатия информации с возможностью восстановления утраченной информации, причем алгоритмы являются независимыми для каждого слоя.

Информация кодируется в цветовой слой, представленный для наглядности в системе градациями серого, причем для одного цвета таких слоев 255. На основе этих слоев воссоздается полноцветное изображение в выбранной системе. Восстановление полноцветного изображения производится суммированием черно-белых слоев, на которые разбито цветное изображение.

Рассмотрим использование стандартных цветовых палитр для представления трехмерного кода в виде цифрового изображения. Палитра изображения представляет собой множество цветов, используемых на изображении (см. рис. 3) [8]. Если изображение хранится в формате RGB, то каждая точка этого множества имеет три координаты: Red (красный), Green (зеленый), Blue (синий). Палитру можно представить набором точек в трехмерном пространстве для RGB. С другой стороны, изображение можно хранить в формате CMY или CMYK (Cyan (голубой), Magenta (пурпурный), Yellow (желтый), Black (черный)) (рис. 4). Таким образом, можно выявить основные цвета и множество слоев для записи информации в многомерном коде.

Выберем RGB в качестве цветовой системы для кодирования. Эта система раскладывается на три слоя: красный, зеленый, синий, следовательно, позволяет сформировать три сообщения, никак

Таблица 3

Результат кодирования трехслойного сообщения

Символы				Кодировка															
М	а	м	а	[Grid of black and white squares representing the encoded message 'Мама']															
М	ы	л	а	[Grid of black and white squares representing the encoded message 'Мыла']															
Р	а	м	у	[Grid of black and white squares representing the encoded message 'Рама']															

Результат кодирования к табл. 3
Исходное сообщение по строкам



Красный слой, содержащий сообщение «Мама»



Зеленый слой, содержащий сообщение «Мыла»



Синий слой, содержащий сообщение «Рама»



Результат кодирования, получаемый при сложении слоев



не связанные друг с другом, и разместить их на одной двумерной матрице (см. рис. 4, табл. 2). В рассмотренном примере для наглядности будем считать, что слой (красный, зеленый или синий) может принимать только два значения — 0 (черный) и 255 (белый). Таким образом, если взять красный цвет и выполнить разбиение на слои RGB с использованием стандартной функции, получим следующее распределение по слоям: 255, 0, 0. В табл. 2 указано распределение по слоям для основных цветов, которые можно разложить на слои с указанным условием (слой может принимать только два значения: 1 или 0).

Таким образом, каждый из основных цветов однозначно соответствует определенному сочетанию значений цветовых слоев. Причем каждый из них принимает значение, соответствующее черному (1) или белому (0) цвету ячейки цветного кода.

При обратном действии сложение слоев позволит получить соответствующий этим слоям один из основных цветов палитры.

В общем случае процесс кодирования информации выглядит следующим образом: подготавливают три

сообщения (для примера используем три сообщения с независимой информацией: первое сообщение «Мама»; второе сообщение «Мыла»; третье сообщение «Рама»). Результат кодирования представлен в табл. 3.

Результат кодирования представляет собой многомерный цветной код, получаемый сложением слоев, образованный основными цветами палитры (см. табл. 2). В многомерном цветном коде три независимых сообщения расположены на двумерной матрице и занимают, соответственно, площадь поверхности в три раза меньше при тех же условиях кодирования (без использования шифрования и добавления избыточной информации).

В этих примерах приведены результаты кодирования текстовой информации, но так же возможно кодировать и любую другую цифровую информацию. При этом цвет кода не передает сведений о содержании информации, являясь индикатором многослойности кода.

Заключение

Таким образом, предложенный многомерный цветной НБК, обеспечивающий высокую плотность размещения любой информации, может быть использован

как для идентификации продукции и защиты ее от подделок, так и для получения подробной информации о продукции или любой другой специальной информации. Данные, содержащиеся в НБК, могут быть представлены в любом цифровом виде или перенесены на физический носитель. При этом объем кода может быть увеличен при сохранении небольшой площади, занимаемой НБК. Использование таких цветных слоев позволяет не только увеличить емкость кода, но и сформировать многомерный код без использования сложных алгоритмов создания трехмерного объекта на основе изображений

с глубиной, специализированных языков моделирования для интерпретации трехмерной сцены в двумерном штрихкоде, сложных систем расширенной реальности.

В работе активное участие принимала канд. техн. наук Е. В. Ларионова, которой были сформулированы принципы 3-мерного цветного НБК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

*Tsvetnye Metally. 2023. No. 8. pp. 19–25
DOI: 10.17580/tsm.2023.08.03*

FEATURES OF COLOUR ULTRADENSE MULTIDIMENSIONAL NANOBARCODES CREATED ON THE SURFACE OF ITEMS MADE OF NON-FERROUS METALS AND THEIR ALLOYS

Information about authors

A. P. Petkova, Professor at the Department of Materials Science and Technology of Art Products¹, Doctor of Technical Sciences, e-mail: Petkova_AP@pers.spmi.ru
O. Yu. Ganzulenko, Associate Professor at the Department of Materials Science and Technology of Art Products¹, Candidate of Technical Sciences, e-mail: Ganzulenko_OYu@pers.spmi.ru

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

The authors of this paper developed an original method to create colour matrix codes aimed at counterfeit protection of items, preventing unauthorized use of information, verifying the authenticity of items, ensuring their clear identification, increasing the ID capacity (text, graphical, audio and video information and other digital data) approximately by 5 times and creating a machine-readable template image of such ID. The proposed colour code helps transform the known black-and-white nanobarcode into a multi-dimensional colour code applied to a two-dimensional matrix or increase the nanobarcode capacity by several times.

Multi-dimensional colour matrix codes enable to increase the amount of data contained in the colour code due to the use of a graphical two-dimensional matrix to which all layers of binary-coded data are applied. It is possible to create digital codes and apply codes to metal surface by printing or laser marking. Definition of reference colour cells ensures that the code will be read and decoded even if the technical characteristics of printers and scanners differ.

The obtained colour palettes and databases of laser marking regimes applicable to titanium, copper and aluminium alloys ensure reproducibility of the main colours for all the mentioned materials. Through the use of four or eight colours in the colour matrix code instead of merely black and white in the two-dimensional one, the code capacity can be increased to two or three bits of information depending on the number of colour layers. By making use of four or eight stable colours, including the background colour, one can create two- and three-layer colour matrix codes on the surface of each of the above listed materials.

Candidate of Technical Sciences E. V. Larionova took an active part in the work, who formulated the principles of creating a 3-dimensional color nanobarcode.

Key words: laser marking, barcode, nanobarcode, colour matrix code, counterfeit protection.

References

1. ISO/IEC 18004. Information technology. Automatic identification and data capture techniques QR Code – Bar code symbology. First edition 2000-06-15. 114 p.
2. Carroll O., Tanguy Y., Houlihan J., Huyet G. Dynamics of a self-pulsing laser with delay. *Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering*. 2004. Vol. 77. pp. 628–635.
3. Valulin A., Gornyi S., Grechko Yu., Patrov M., Yudin K. et al. Laser marking of materials. *Photonics Russia*. 2007. No. 3. pp. 16–22.
4. Odintsova G., Andreeva Y., Salminen A., Roozbahani H., Van Cuong L. et al. Investigation of production related impact on the optical properties of color

laser marking. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 274. p. 116263. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116263.

5. Pryakhin E. I. Nanobarcode as a universal two-dimensional ID offering new opportunities. *Journal of Mining Institute*. 2015. Vol. 215. pp. 97–100.

6. Pryakhin E. I., Larionova E. V., Zakharenko E. A. Nanobarcode as a multifunctional product identification and protection system. *Photonics Russia*. 2014. Vol. 48, No. 6. pp. 12–19.

7. Pryakhin E. I., Larionova E. V., Zakharenko E. A. Method of digital information in the form of ultra-compressed nano bar code encoding and decoding (options). Patent RF, No. 2656734. Applied: 27.12.2013. Published: 06.06.2018. Bulletin No. 16.

8. Petkova A. P., Ganzulenko O. Yu. Laser marking of non-ferrous metal and alloy products using ultradense barcodes: process features. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 7. pp. 92–97.

9. Gornyi S., Veyko V., Odintsova G., Loginov A., Karlagina Yu. et al. Colour laser marking of metal surface. *Photonics Russia*. 2013. Vol. 42, No. 6. pp. 34–45.

10. Veyko V. P., Gornyi S. G., Odintsova G. V., Patrov M. I., Yudin K. V. Multi-colour images created on metal surface during its laser oxidation. *Journal of Instrument Engineering*. 2011. Vol. 54, No. 2. pp. 47–52.

11. Konchus D. A., Pryakhin E. I., Sivenkov A. V. Structural variations on the surface of metallic products at laser marking. *CIS Iron and Steel Review*. 2021. Vol. 22. pp. 96–101.

12. Konchus D., Salpagarov E., Sivenkov A. Temperature influence on readability of the QR-code on titanium alloy. *Key Engineering Materials*. 2022. No. 909. pp. 54–59. DOI: 10.4028/p-4hhoi9.

13. Pritotskiy E. M., Pritotskaya A. P., Burtseva A. A., Pankova M. A. et al. Experimental research on chromaticity formation on metals surface by laser radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2018. Vol. 18, No. 4. pp. 581–587.

14. Pryakhin E. I., Troshina E. Yu. Degradation induced by thermal and chemical impacts on matrix codes installed on brass and aluminium alloy parts by laser. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 7. pp. 87–91.

15. Veiko V., Karlagina Y. Y., Moskvina M., Mikhailovskii V. Y., Odintsova G. et al. Metal surface coloration by oxide periodic structures formed with nanosecond laser pulses. *Optics and Lasers in Engineering*. 2017. Vol. 96. pp. 63–67.

16. Pryakhin E. I., Larionova E. V., Zakharenko E. A. Creation and testing of hardware and software package for applying information fields to product surface. *Journal of Mining Institute*. 2014. Vol. 209. pp. 234–238.

17. Rasskazchikov N. G., Polyakova A. A. A study of the laser marking process and its optimization. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*. 2019. Vol. 7, No. 1. pp. 9–13. DOI: 10.24892/RIJE/20190102.

18. Odintsova G. V. Understanding and developing the process of colour laser marking of metals by local oxidation: Extended abstract of PhD dissertation. St Petersburg : Sankt-Peterburgskiy natsionalnyi issledovatel'skiy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki, 2014. 20 p.

19. Ageev E. I., Veiko V. P., Vlasova E. A., Karlagina Y. Y., Krivososov A. S. et al. Controlled nanostructures formation on stainless steel by short laser pulses for products protection against falsification. *Optics Express*. 2018. Vol. 26, Iss. 2. pp. 2117–2122.

20. Morozova I. G., Naumova M. G., Zarapin A. Yu., Borisov P. V. Marking a copper alloy by changing its surface topology under the impact of laser thermal processing. *Metallurg*. 2018. No. 5. pp. 56–60.

21. Xiaolei M., Xihan N., Jingnan Z., Pranav S., Yan Z. Effect of nanosecond pulsed laser parameters on the color marking of 304 stainless steel. *Optics and Laser Technology*. 2020. Vol. 126. p. 106104. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106104.

22. Gornyi S. G., Zakharenko E. A., Klassen N., Kolobov Y. R., Ligachev A. et al. Laser formation and influence of laser radiation on basic characteristics of barcodes. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022. Vol. 13. pp. 879–886.

23. Antonov D. N., Burtsev A. A., Butkovskiy O. Ya. Metal surface coloration under the impact of pulsed laser radiation. *Technical Physics*. 2014. Vol. 84, No. 10. pp. 83–86.
24. Amiaga John V., Ramos-Velazquez A. R., Gorny S. G., Vologzhanina S. A., Michtchenko A. Groove formation on metal substrates by nanosecond laser removal of melted material. *Metals (MDPI)*. 2021. No. 11. pp. 1–14. DOI: 10.3390/met11122026.
25. Veiko V. P., Odintsova G. V., Gazizova M. Y., Karlagina Y. Y., Manokhin S. S. et al. The influence of laser micro- and nanostructuring on the wear resistance of Grade-2 titanium surface. *Laser Physics*. 2018. Vol. 28, No. 8. p. 086002.
26. Konchus D. A., Sivenkov A. V. A surface structure formation of stainless steel using a laser. *Materials Science Forum*. 2021. No. 1022. pp. 112–118. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.112.
27. Chang C.-L., Cheng C.-W., Chen J.-K. Femtosecond laser-induced periodic surface structures of copper: Experimental and modeling comparison. *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 469. pp. 904–910. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.11.059.
28. Alekseev V. I., Barakhtin B. K., Zhukov A. S. Chemical inhomogeneity as a factor of raising the strength of selective laser melted steels. *Journal of Mining Institute*. 2020. No. 242. pp. 191–196. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.191.
29. Salpagarov E. M., Belyakov A. A., Sivenkov A. V. Improvement of mechanical properties of the tool using nanocomposite coatings. *Materials Science Forum*. 2021. No. 1040. pp. 68–74. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.68.
30. Tomaev V. V., Polischuk V. A., Vartanyan T. A., Mjakin S. V., Leonov N. B. et al. Studies of zinc and zinc oxide nanofilms of different thickness prepared by magnetron sputtering and thermal oxidation. *Optics and Spectroscopy*. 2021. No. 129. pp. 1033–1037. DOI: 10.1134/S0030400X21070201.
31. Amiaga J. V., Gorny S. G., Vologzhanina S. A. Development of a fast method for forming Braille on the surface of steels with IR nanosecond pulsed 50W fiber laser. *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2285. p. 040003.
32. Amiaga J. V., Gorny S. G., Vologzhanina S. A. Method of convex marking of the surfaces of steel products using a pulsed 50-W infrared fiber laser. *Metally*. 2020. No. 13. pp. 1513–1517.
33. Stepanov S. N., Larionova T. A., Stepanov S. S. Understanding the effect of aluminium on the adhesion of stainless steel during flame spraying. *Journal of Mining Institute*. 2020. No. 245. pp. 591–598. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.11.
34. Morozova I. G., Naumova M. G., Zарapin A. Y., Borisov P. V. Copper alloy marking by altering its surface topology using laser heat treatment. *Metallurgist*. 2018. No. 62. pp. 464–469.
35. Olt Yu., Maksarov V. V., Krasnyi V. A. Understanding the wear resistance of mine dump truck engine bearings subjected to fretting corrosion. *Journal of Mining Institute*. 2019. No. 235. pp. 70–77. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.70.
36. Gorbatuk S. M., Naumova M. G., Morozova I. G. Color mark formation on a metal surface by a highly concentrated energy source. *Metallurgist*. 2016. Vol. 60, No. 5. pp. 646–650.
37. CMYK and RGB for printing: What is the difference? Devis printing system. Available at: <https://npt.ru/blog/cmyk-i-rgb-dlja-pechati-v-chem-rznicza> (Accessed: 05.07.2023).

Улучшение механических свойств эпоксидных покрытий по металлу наночастицами разной природы

УДК 669:678.06:544.72



Н. Р. Прокопчук,
профессор кафедры
полимерных композиционных
материалов¹, докт. хим. наук,
член-корр. Национальной
академии наук Беларуси,
эл. почта: nprok@gmail.com



А. Г. Сырков,
профессор кафедры общей
и технической физики²,
докт. техн. наук,
эл. почта: syrkovandrey@mail.ru



А. Ю. Ключев,
профессор
кафедры технологии
деревообрабатывающих
производств¹, докт. техн. наук,
эл. почта: tnsippm@belstu.by



И. О. Лаптик,
инженер кафедры полимерных
композиционных материалов¹,
эл. почта: inna.laptyk@yandex.ru

¹ Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь.

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Разработаны нетоксичные эпоксидные композиции для противокоррозийной обработки металлов на основе смолы ЭД-20 и нового отвердителя — канифолетерпеностирольномалеинового аддукта (КТСМА), получаемого из возобновляемого растительного сырья. Для повышения устойчивости отвержденной смолы к ударным нагрузкам в композиции смола — отвердитель вводили пластификатор ДЭГ-1 в количестве 7 % от массы смолы. В составе КТСМА имеются функциональные ангидридные и карбоксильные группы, необходимые для взаимодействия с эпоксидными и гидроксильными группами эпоксидной смолы (ЭС) с образованием пространственной сшитой структуры покрытия.

Покрытия по стали на основе ЭД-20, отверждаемые токсичным тетраэтиленпентамином (ТЭПА), обладают несколько лучшими физико-механическими свойствами по сравнению с отвержденными КТСМА: большей твердостью — 0,30 отн. ед. против 0,20 отн. ед. и лучшей адгезией — 3 балла против 4. Это может быть связано с гораздо большим объемом молекул отвердителя КТСМА по сравнению с молекулами ТЭПА, что снижает плотность сшитой пространственной структуры покрытий.

Для повышения устойчивости к механическим воздействиям и химическим агрессивным средам покрытия модифицированы наночастицами разной природы, включая оксиды цветных металлов TiO₂ и ZnO. Установлено, что наномодифицирование разработанных композиций наночастицами TiO₂, ZnO и ударопрочными алмазами (УДА СП, ША-А) в сверхмалых количествах (0,005; 0,010; 0,020 % (мас.)) позволяет существенно повысить эксплуатационные свойства антикоррозионных покрытий.

Предложена гипотеза образования надмолекулярной структуры разработанных покрытий по типу взаимопроникающих сеток. На поверхности наночастиц имеются функциональные полярные группы и их нескомпенсированный электрический заряд.