

УДК 621.7

**Ю.А. Казимиренко, Н.Ю. Лебедева, А.А. Карпеченко, А.А. Жданов**  
**ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОВЫШЕННОЙ**  
**ПРОЧНОСТЬЮ, ДЕМПФИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ И КОЭФФИЦИЕНТОМ**  
**ПОГЛОЩЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

*Исследованы особенности формирования структуры электродуговых покрытий из 65Г, Св-08Г2С с повышенной прочностью, демпфирующей способностью и коэффициентом поглощения ионизирующих излучений.*

*Ключевые слова:* электродуговые покрытия, термическая обработка, полые стеклянные микросферы, твердость, демпфирующие свойства, рентгенозащитные свойства.

*Форм. 2. Табл. 1. Рис. 2. Лит. 11.*

**Ю.О. Казимиренко, Н.Ю. Лебедева, А.А. Карпеченко, О.О. Жданов**  
**ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ З ПІДВИЩЕНОЮ МІЦНІСТЮ,**  
**ДЕМПФІРУЮЧОЮ ЗДАТНІСТЮ І КОЕФІЦІЄНТОМ ПОГЛИНАННЯ ІОНІЗУЮЧИХ**  
**ВИПРОМІНЮВАНЬ**

*Досліджено особливості формування структури электродугових покриттів із 65Г, Св-08Г2С з підвищеною міцністю, демпфувальною здібністю та коефіцієнтом поглинання іонізуючих випромінювань*

*Ключові слова:* электродугові покриття, термічна обробка, порожні скляні микросфери, твердість, демпфувальна здібність, рентгенозахисні властивості.

**Y. Kazymyrenko, N. Lebedeva, A. Karpechenko, A. Zhdanov**  
**THE FORMATION OF ELECTRO-ARC COATINGS WITH ENHANCED STRENGTH,**  
**DAMPING CAPACITY AND THE ABSORPTION COEFFICIENT OF IONIZING RADIATION.**

*The features of the structure formation of electro-arc coverings 65Г, Св-08Г2С with enhanced strength, damping capacity and the absorption coefficient of ionizing radiation were investigated.*

*Keywords:* electro-arc coverings, heat treatment, hollow glass microspheres, hardness, damping properties, X-ray protective properties.

**Постановка проблемы.** Электродуговое напыление является одним из перспективных методов формирования покрытий на поверхности изделий, достоинствами которого являются простота, технологичность, высокие производительность и коэффициент использования материала. Относительная стоимость электродуговых покрытий в 3-10 раз ниже, чем у покрытий, полученных другими методами газотермического напыления, энергетический КПД и коэффициент использования материала может достигать 0,7...0,9 [6].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Электродуговые покрытия традиционно применяют для защиты от коррозии, восстановления и повышения прочности изношенных деталей машин и механизмов. Возможность проведения работ как на закрытом участке, так и на открытых монтажных площадках, отсутствие ограничений по требованиям, предъявляемых к габаритам и конфигурации изделий, существенно расширяют их области применения и делают незаменимыми для защиты конструкций технических и транспортных средств, предназначенных для перевозки и хранения опасных грузов, в том числе и радиоактивных [11]. Большинство этих конструкций работает в условиях перепада температур, износа, интенсивных вибраций, тепловых и ионизирующих излучений. Поэтому материалы и покрытия, применяемые для их изготовления, должны обладать комплексом защитных свойств: высокой прочностью, износостойкостью, демпфирующей способностью и рентгенозащитными свойствами.

**Нерешенные части проблемы.** Эксплуатационные характеристики стальных электродуговых покрытий из 65Г, Св-08Г2С непосредственно связаны с особенностями формирования их структуры. Современные подходы к проблеме повышения эксплуатационных характеристик металлов и сплавов заключаются преимущественно в формировании наноструктуры. Существуют определенные технологические сложности создания объемных нанокристаллических материалов, поэтому более доступными являются материалы и покрытия с наноструктурными элементами. Большинство способов получения покрытий с наноструктурными элементами являются достаточно дорогостоящими. В работе [4] исследовано формирование субмикроструктурной структуры, деформированных металлов и напыленных покрытий путем проведения предрекристаллизационной термической обработки, в результате которой существенно повышается твердость, износостойкость и снижается теплопроводность. При этом другие эксплуатационные характеристики покрытий остаются еще недостаточно изученными.

Проведенные в работах [7, 8 11] исследования показали целесообразность введения в состав электродуговых покрытий из Св-08Г2С дисперсных наполнителей – полых стеклянных микросфер (ПСМ). Формирование полидисперсной структуры способствует повышению рентгенозащитных характеристик покрытий. При этом остается малоизученным вопрос формирования субмикроструктурной структуры таких покрытий под действием термической обработки и влияния на другие эксплуатационные характеристики.

**Целью работы** является исследование влияния особенностей структуры и предкристаллизационной термической обработки на демпфирующую способность, прочностные и рентгенозащитные свойства стальных электродуговых покрытий из проволок 65Г, Св-08Г2С, и композиции Св-08Г2С–ПСМ.

**Основные результаты исследований.** В основу методов повышения прочностных и защитных характеристик электродуговых покрытий положены принципы формирования полидисперсной структуры и образования субмикроструктурных элементов, что возможно в результате проведения предкристаллизационной термической обработки при температурах начала рекристаллизации металла покрытия [4, 5].

В качестве предмета исследований в работе рассмотрены три вида электродуговых покрытий: 65Г, Св-08Г2С и Св-08ГС, наполненное полыми стеклянными микросферами (композиция Св-08Г2С–ПСМ), сформированных на стальной подложке из Ст 3. В качестве критерия прочности выбрана твердость по Виккерсу. Количественной характеристикой демпфирующей способности материалов является относительное рассеяние энергии (или коэффициент рассеяния  $\psi$ ), который определяется как отношение рассеянной энергии за цикл колебаний к максимальному амплитудному значению энергии, накопленной системой в начале рассматриваемого цикла [10]. Показателем рентгенозащитных свойств является массовый коэффициент поглощения рентгеновских излучений (РИ) [2], равный отношению коэффициента поглощения РИ  $\mu$  к плотности покрытия:

$$\mu_{\text{мас}} = \frac{\mu}{\rho} \quad (1).$$

*Материалы и методика проведения исследований.* Для формирования покрытий соответственно использовали цельнотянутые сварочные проволоки марок 65Г (ГОСТ 9389-75), Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70). Напыление осуществляли при помощи установки КДМ-2. Стальную подложку из Ст 3 размером 140 x 100 x 1,5 мм предварительно подвергали струйно-абразивной обработке. Нанесение покрытий осуществлялось на следующих режимах: сила тока – 80...140 А; напряжение – 25...28 В; давление сжатого воздуха – 0,4...0,6 МПа; диаметр основного сопла – 6 мм; дополнительного – 8 мм; расстояние от среза дополнительного сопла к подложке – 90...100 мм. Средняя толщина покрытий составляла 0,5 мм.

В качестве дисперсного наполнителя в состав электродугового покрытия вводили полые стеклянные микросферы натрийсиликатного состава марки МС-А9 (ТУ 6-48-108-94). Полые стеклянные микросферы (ПСМ) представляют собой наполненные серным ангидридом  $\text{SO}_3$  сыпучие порошки, средний диаметр которых составляет 40 мкм, толщина стенки 1-2 мкм [1]. Напыление композиционного покрытия осуществляли при помощи усовершенствованного электродугового аппарата ЭМ-14М, входящего в комплект установки КДМ-2 [8]. Среднее объемное содержание микросфер в составе покрытий составило 15 %.

Режимы предкристаллизационной термической обработки выбраны на основании рекомендаций, представленных в работах [4, 5, 9], с учетом температуры начала рекристаллизации стали 480 °С и температурного интервала размягчения ПСМ, который находится в интервале значений 485...865 °С [1, 8]. Поэтому температура термической обработки электродуговых покрытий составила 500 °С. Термическую обработку покрытий проводили в лабораторной электропечи марки СНОЛ-1.6.2.08/9-М1. Время выдержки подобрано экспериментально в соответствии с рекомендациями [4, 5] и составило 1,5 мин для всех исследуемых образцов, охлаждение осуществляли на воздухе.

Исследования микроструктуры сформированных электродуговых покрытий осуществляли электронной и оптической микроскопией, соответственно, при помощи электронного микроскопа-микроанализатора РЭММА-102-02 и металлографического микроскопа ММР-2Р. Качественный фазовый рентгеноструктурный анализ полученных образцов выполняли на установке ДРОН-3. Съемку дифрактограмм проводили в излучении  $\text{MoK}(\alpha = 0,17069)$ .

В тех случаях, когда исследование процессов формирования субмикрорекристаллических элементов при помощи электронной микроскопии затруднительно вследствие временного и пространственного разрешений, целесообразно использовать рентгеноструктурный анализ и расчетные методы [3]. Поэтому для анализа формирования субмикрорекристаллических элементов структуры использовали размеры областей когерентного рассеивания (ОКР), рассчитанные по формуле Селякова-Шеррера.

Кажущаяся плотность покрытий была определена в результате гидростатического взвешивания. Общая пористость рассчитывалась с использованием значений кажущейся плотности. Твердость напыленных покрытий измерялась по методу Виккерса на приборе ТП при нагрузке на индентор 5 кг, погрешность измерений не превышала ±10 %. Для покрытий Св-08Г2С-ПСМ измеряли твердость металлической матрицы.

Для определения демпфирующей способности был выбран метод свободных затухающих поперечных колебаний консольно-закрепленных образцов, который является наиболее простым и надежным [10]. Исследования проводили на специальной установке [12] с цифровым способом записи виброграмм, по результатам обработки которых были рассчитаны логарифмический декремент  $\delta$ , % и коэффициент рассеяния энергии  $\psi$ , %. Исследования проводились при частоте 10...40 Гц.

Рентгенозащитные характеристики, в том числе и массовый коэффициент поглощения рентгеновских излучений экспериментально исследованы по методике, изложенной в работе [7] при помощи рентгеновской установки ДРОН-3, где в качестве источника излучения использовали трубку БСВ-24 с медным анодом  $Cu_{k\alpha=1,54178}$ . При проведении экспериментальных работ измеряли интенсивность падающего потока излучения  $I_0$  и потока излучения  $I$ , прошедшего через образец толщиной  $\delta$ . По результатам измерений по формуле (1) рассчитывали линейный коэффициент поглощения рентгеновского излучения, значения которого дальше использовали для определения массового коэффициента поглощения излучения по формуле (2)

$$\mu = -\frac{1}{\delta} \ln \frac{I_0}{I} \quad (2).$$

Поскольку электродуговые покрытия 65Г предназначены для повышения износостойкости деталей, работающих в условиях вибраций, например, золотников, опор, измерения рентгенозащитных характеристик для них не проводилось.

Результаты экспериментальных исследований сведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства электродуговых покрытий

Свойства	Св65Г	Св08Г2С	Св08Г2С –ПСМ
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	6300	6400	6100
Пористость, %	18	17	21
Характеристики покрытий до термообработки			
HV <sub>5</sub> , МПа	2500	1700	2000
$\delta$ , %	2,7	1,40	9,23
$\Psi$ , %	5,4	2,80	18,46
$\mu_{\text{мас}}$ , см <sup>2</sup> /г	–	2,46	4,00
Размер ОКР, нм	374	106	111
Характеристики покрытий после термообработки			
HV <sub>5</sub> , МПа	2700	2400	2540
$\delta$ , %	7,15	4,95	10,48
$\Psi$ , %	14,5	9,90	20,96
$\mu_{\text{мас}}$ , см <sup>2</sup> /г	–	2,5	5,1
Размер ОКР, нм	287	62	97

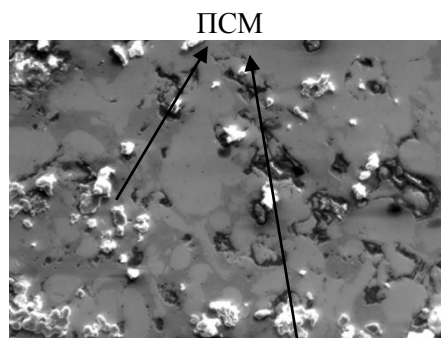
На рис. 1 представлена микрофотография полых стеклянных микросфер, полученных при помощи оптического микроскопа ММР-2Р.

На рис. 2 представлена микроструктура (полученная при помощи РЭММА-102-а) электродугового покрытия из Св08Г2С, наполненного полыми стеклянными микросферами.

Из представленных в табл. 1 данных видно, что введение в состав стальных электродуговых покрытий дисперсных наполнителей – полых стеклянных микросфер



*Рис. 1. Полые стеклянные микросферы, x 200*



*Рис. 2. Микроструктура электродугового покрытия из Sv08Г2С, наполненного полыми стеклянными микросферами, x 120*

(15 % объёмн.) приводит к значительному повышению демпфирующей способности: коэффициент рассеяния энергии возрастает более чем в 6 раз. Кроме того, на 63 % увеличивается коэффициент поглощения рентгеновских излучений. Рентгеновское излучение, проходя через композиционную среду, наполненную ПСМ, встречает тройную поверхность раздела: стенка ПСМ –  $\text{SO}_3$  – стенка ПСМ. Таким образом, поток лучей поглощается трижды.

В результате проведенных микроструктурных и рентгеноструктурных исследований установлено, что структура дисперсно наполненного покрытия Sv-08Г2С–ПСМ представляет собой стальную матрицу с равномерно расположенными полыми стеклянными включениями сферической формы, которые в процессе напыления сохраняют аморфное состояние. На поверхности раздела сталь – стекло вследствие разницы коэффициентов линейного термического расширения возникают микронапряжения [8], которые приводят к микропластической деформаций и необратимому рассеянию энергии в результате динамических колебаний. Как показали результаты рентгеноструктурного анализа на поверхности раздела фаз металл – стекло образуется новая фаза – силицид железа  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$  с размером ОКР 87 нм, которая после проведения термической обработки превращается в  $\text{Fe}_5\text{Si}$  с размером ОКР 75 нм.

В результате проведения предрекристаллизационной термической обработки твердость покрытий из 65 Г возрастает на 8 %, Sv08Г2С на 41%, композиции Sv08Г2С–ПСМ – на 25 %. Коэффициент рассеяния энергии образцов с покрытием из Sv65Г увеличивается на 63 %, Sv08Г2С – на 35 %, Sv08Г2С–ПСМ – на 59 %. Применение предрекристаллизационной термической обработки для электродуговых покрытий из Sv08Г2С и Sv08Г2С–ПСМ позволит не только увеличить показатели прочности и демпфирующей способности, но и на 16...27 % повысить их рентгенозащитные характеристики.

Для электродуговых покрытий из Sv-08Г2С значения ОКР после предрекристаллизационной термической обработки, обеспечивающей максимальную твердость, в 1,7 раз меньше, чем в состоянии после напыления и составляет 100 нм. Значение ОКР покрытий из Sv65Г после термической обработки уменьшается незначительно и составляет около 300 нм. Во время электродугового напыления происходит деформация дисперсных частиц и измельчение зерен, при последующем нагревании до температуры начала первичной рекристаллизации происходят процессы предрекристаллизационной полигонизации. Благодаря возрастающей

плотности дислокаций в деформированных зернах образуется большое количество зародышей новых субзерен, что при коротком времени выдержки приводит к измельчению субструктуры покрытия. Для наполненных микросферами покрытий формирование субмикроструктурной структуры в процессе предкристаллизационной термической обработки происходит не только в стальной матрице, но и на поверхности раздела сталь – стекло. Формирование таких субмикроструктурных элементов в структуре покрытия в значительной степени ослабляет действие рентгеновского излучения.

*Практические рекомендации и перспективы дальнейших исследований.* Проведенные экспериментальные исследования позволяют рекомендовать электродуговые покрытия для дальнейшей эксплуатации в условиях вибраций с частотой 10...30 Гц и диапазона рентгеновских излучений. Проведенные в работе исследования показали эффективность применения для электродуговых покрытий предкристаллизационной термической обработки. Однако предлагаемая технология вследствие кратковременного нагрева имеет ограничения для крупногабаритных изделий. Поэтому перспективы дальнейших исследований непосредственно связаны с разработкой технологии термической обработки для крупногабаритных изделий при помощи печей с индукционным нагревом.

#### **Выводы:**

1. Введение в состав стальных электродуговых покрытий дисперсных наполнителей – полых стеклянных микросфер (15 % объемн.) приводит к увеличению демпфирующей способности и рентгенозащитных свойств: коэффициент рассеяния энергии возрастает более чем в 6 раз, коэффициент поглощения рентгеновских излучений – на 63 %.

2. Предкристаллизационная термическая обработка электродуговых покрытий из 65Г, Св-08Г2С и Св-08Г2С–ПСМ при температуре первичной рекристаллизации и кратковременной выдержке с последующим охлаждением на воздухе, способствует формированию субмикроструктурной структуры, что приводит к увеличению эксплуатационных характеристик: твердость покрытий из 65 Г возрастает на 8 %, покрытий из Св-08Г2С – на 41%; коэффициент рассеяния энергии образцов с покрытием из 65Г увеличивается на 63 %, Св-08Г2С – на 35 %, Св-08Г2С–ПСМ – на 59 %.

3. Применение предкристаллизационной термической обработки для электродуговых покрытий из Св-08Г2С и композиции Св-08Г2С–ПСМ позволит на 16...27 % повысить их рентгенозащитные характеристики.

1. *Асланова М.С.* Полые неорганические микросферы / М.С. Асланова, В.Я. Стеценко, А.Ф. Шустров // *Обзор. Информ. Сер. Химическая промышленность за рубежом / НИИТЭХИМ.* – 1981. – Вып. 9. – С. 33-50.
2. *Бреховских С.М.* Радиационные эффекты в стеклах / С.М. Бреховских, Ю.Н. Викторова, Л.М. Ланда. – М.: Энергоиздат, 1982. – 184 с.
3. *Гусев А.И.* Аттестация нанокристаллических материалов по размеру частиц (зерен) / А.И. Гусев, А.С. Курлов // *Металлофизика и новейшие технологии*, 2008. Т. 30, № 5. – С. 679 – 694.
4. *Дубовий О.М.* Вплив передкристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості напильних покриттів та деформованих металів і сплавів / Н. Ю. Лебедева, Т. А. Янковець // *Металознавство та обробка металів*, 2010, № 3 (55). – С. 7 – 11.
5. *Дубовий О.М.* Дослідження можливостей підвищення фізико-механічних властивостей деформованих металів і сплавів термічною обробкою / Н.Ю. Лебедева, Т.А. Янковець, А.А. Карпеченко, О.О. Жданов // *Зб. наук. праць НУК.* – Миколаїв: НУК, 2010. – № 3 (432). – С. 69 – 78.
6. *Коробов Ю.С.* Эффективность применения активированной дуговой металлизации для нанесения защитных покрытий / Ю.С. Коробов // *Сварочное производство.* – 2005. – № 2. – С. 47 – 49.
7. *Казимиренко Ю.А.* Исследование ослабления ионизирующего излучения композиционными материалами / Ю. А. Казимиренко, А.А. Карпеченко, С.И. Шкурят, А.А. Жданов // *Зб. наук. праць НУК: Миколаїв: НУК*, 2009. – Вип. № 2 (425). – С. 105 – 109.
8. *Казимиренко Ю. А.* Формирование ультрадисперсной структуры в композиционных электродуговых покрытиях, наполненных полыми стеклянными микросферами / Ю.А. Казимиренко, А.А. Карпеченко, А.А. Жданов, К.О. Тумаков // «Вісник Національного університету кораблебудування» [Електронний ресурс]. – Миколаїв : НУК, 2012, № 3. – Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua>.
9. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов / И.И. Новиков. – М.: Изд-во «Металлургия», 1978.–392 с.
10. *Писаренко Г.С.* Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов: Справочник / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – К.: Наукова думка, 1971. – 375 с.
11. *Фарионова Т. А.* Выбор состава композиционных материалов и покрытий технических средств для перевозки опасных грузов на основе экспертных оценок / Т. А. Фарионова, Ю. А. Казимиренко // «Вісник Національного університету кораблебудування» [Електронний ресурс]. – Миколаїв: НУК, 2010. – № 5.– Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua>.
12. *Шведов Л.И.* Исследование демпфирующей способности марганцево-медных сплавов / Л.И. Шведов, Н.Ю. Лебедева // *Технология судостроения и сварочного производства: Сб. н. тр.* – Николаев: УГМТУ, 1996. – С. 3-6.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013.