



Yuliya A. Kazimirenko
Казимиренко
Юлия
Алексеевна

УДК 620.267
К 14

RADIATION RESISTANCE OF METAL-GLASS COATINGS FOR FLOATING COMPOSITE STRUCTURES

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПЛАВУЧИХ КОМПОЗИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

DOI 10.15589/SMI. 2015.01.05

Yuliya A. Kazimirenko Ю. А. Казимиренко, канд. техн. наук, доц.¹
yuliia.kazymyrenko@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0002-7120-8226

Valentina V. Shlapatskaya В. В. Шлапацкая, канд. хим. наук²
radmakiev@ukr.net
ORC ID: 0000-0002-7097-5335



Valentina V. Shlapatskaya
Шлапацкая
Валентина
Васильевна

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev*

²*Government Enterprise «Radma» of Lev. V. Pisarzhevskij Institute of Physical Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyev*

¹*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*
²*ДП «Радма» ИФХ им. Л. В. Писаржевского НАН Украины, г. Киев*

Abstract. The article discusses the prospects of application of new metal and glass electric arc coatings made of Sv-08G2C and Sv-AMg5 filled with hollow glass microspheres, powders, liquid silicate and the leaded glass for protection of steel structures from γ -radiation. The purpose of study is to investigate the radiation resistance of metal and glass coatings under γ -radiation Co^{60} . Physical and mechanical properties of the coatings and coated steel samples made of St3 are experimentally studied: microhardness, tensile strength and yield strength. Structural and phase changes are studied using the methods of electronic and optical microscopy, an X-ray analysis. The influence of glass excipients on the stability of the structure and properties of coatings under γ -radiation is noticed. A qualitative comparison of metal-glass coatings to traditionally used lead-containing materials is performed. It is found out that under the influence of γ -radiation of Co^{60} with the electron energy $E = 2.0, 4.5$ MeV in electric arc metal-glass coatings there is no structural and phase transitions and the irradiation process is accompanied by surface hardening, coated steel plates made of St3 preserve stable mechanical properties. The study results can be applied for designing the protection against γ -radiation for technical equipment, energy facilities and transport.

Keywords: floating composite structures; radiation resistance; γ -radiation; electric arc coatings; structure; mechanical properties.

Аннотация. Исследовано влияние γ -излучения Co^{60} на структуру и механические свойства композиционных электродуговых покрытий на основе Св-08Г2С и Св-Амг5, наполненных полыми стеклянными микросферами, порошками натрийсиликатного и свинцовосодержащего стекла. Показаны перспективы применения покрытий в составе конструкций плавучих композитных сооружений для перевозки и хранения радиоактивных веществ низкой и средней активности.

Ключевые слова: плавучие композитные сооружения; радиационная стойкость; γ -излучения; электродуговые покрытия; структура; механические свойства.

Анотація. Досліджено вплив γ -випромінювання Co^{60} на структуру та механічні властивості электродугових покриттів на основі Св-08Г2С і Св-Амг5, наповнених порожніми скляними микросферами, порошками натрийсиликатного і свинцевомісткого скла. Показано перспективи застосування покриттів у складі конструкцій плавучих композитних споруд для перевезення і зберігання радіоактивних речовин низької і середньої активності.

Ключові слова: плавучі композитні споруди; радіаційна стійкість; γ -випромінювання; электродугові покриття; структура; механічні властивості.

References

Zelenskiy V. F., Neklyudov I. M., Chernyaeva T. P. *Radiatsionnye defecty i raspukhaniye metallov* [Radiation defects and swelling of metals]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1988. 296 p.

Klepikov V.F., Brekhovetskiy V.V., Poyda A.V., Litvinenko V.V., Poyda V.P., Kivnik V.F., Uvarov V.T. *Izmeneniye struktury i sverkhplastichnykh svoystv plastin alyuminiyevykh splavov vozdeystviyem impulsnogo puchka relyativistskikh elektronov* [Changing of Structure and Superplastic Properties of Aluminium Alloy Plates by Affecting with Pulsed Beam of Relativistic Electrons]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya. Fizika radiatsionnykh povrezhdeniy i radiatsionnoye materialovedeniye* [Issues of nuclear science and engineering. Series of physics of radiation damages and radiation material science], 2003, no. 6, pp. 86–88.

Pavlenko V.I., Matyukhin P.V. *Osnovnyye aspekty razrabotki sovremennykh radiatsionno-zashchitnykh konstruytsionnykh metallokompozitnykh materialov* [Basic Aspects of Development of Modern Irradiation-protecting Construction Metal-composite Materials]. *Sovremennyye naukoiemkiye tekhnologii — Modern high-end technologies*, 2005, no. 20, pp. 85–86.

Pikaev A.K. *Sovremennaya radiatsionnaya khimiya. Osnovnye polozheniya. Eksperimentalnaya tekhnika i metody* [Modern Irradiation Chemistry: Basic Principles: Experimental Technique and Methods]. Moscow, Nauka, Publ., 1985. 375 p.

Pogrebnyak A.D., Kulmentyeva O.P. *Strukturno-fazovye prevrashcheniya v poverkhnostnykh sloyakh i svoystva metallicheskikh materialov posle impylnogo vozdeystviya puchkov chastits* [Structural Phase Conversions in Surface Layers and Properties of Metal Materials after Pulse Particle Beams]. *FIPFIPSE — FIPFIPSE*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 108–136

Vyshniakov L.R., Hrudina T.V., Horobynska V.D., Yaremenko O.P. *Svyntsevomistke sklovolokno dlia radiatsii-nozakhyshchennykh kompozytiv* [Lead-containing Fiberglass for Irradiation-protecting Composites]. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynnohydyvanni* [New materials and technologies in metallurgy and engineering], 2007, issue 1, pp. 97–100.

Farionova T.A., Kazimirenko Y.A. *Vybor sostava kompozitnykh materialov i pokrytyy tekhnicheskikh sredstv dlya perevozki opasnykh gryzov na osnove ekspertnykh otsenok* (Selection of Composition of Composite Materials and Coatings of Technical Means for Transporting Dangerous Cargos on the Basis of Expert Assessment). *Visnyk Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia — NUS Journal. Electornic Edition*, 2010, no. 5. Available at: <http://ev.nuos.edu.ua> (accessed April 20, 2012).

Kazimirenko Y.A., Karpechenko A.A., Zhdanov A.A., Tumakov K.O. *Formirovaniye ultradispersnoy struktury v kompozitsinnykh elektrodugovykh pokrytyyakh, napolnennykh polymi steklyannymi mikrosferami* (Formation of Ultra-disperse Structure in Composite Electric Arc Coatings Filled with Hollow Glass Microspheres). *Visnyk Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia — NUS Journal. Electornic Edition*, 2012, no. 3. Available at: <http://ev.nuos.edu.ua> (accessed April 15, 2012).

Problem statement. Modern experience of maritime transportation of radioactive substances of low and medium activity is focused on the operation of specialized floating structures as transshipment and temporary storage points. The solving of the problem of the complex protection of structures from the harmful effect of goods includes the design and manufacturing of structures of biological protection, the primary purpose of which is to reduce the intensity of ionizing radiation. The increase of the protection is achieved through a combination of layers of different composition and properties, as well as the use of heterogeneous composite materials and coatings. The important operational characteristic of applied materials is the radiation resistance, the material ability to maintain its properties in terms of the ionizing radiation [4].

The low-carbon and low-alloyed corrosion-resistant steels which are exposed to the radiation swelling and embrittlement [4] in the long-term performance are used as structural materials in containers development for transportation of radioactive cargoes of low and medium activity. It is possible to increase the constructions performance properties due to the radiation-resistant coatings which are applied on their surface [3, 6]. If the materials are promising for the appliance in a wide range

Постановка проблемы. Современный опыт морских перевозок радиоактивных веществ низкой и средней активности ориентирован на эксплуатацию специализированных плавучих сооружений как пунктов перегрузки и временного хранения. Решение проблемы комплексной защиты конструкций от вредного воздействия грузов включает проектирование и изготовление конструкций биологической защиты, основным назначением которых является уменьшение интенсивности ионизирующих излучений. Повышение защиты достигается за счет комбинации слоев с разным составом и свойствами, а также применения гетерогенных композиционных материалов и покрытий. Важной эксплуатационной характеристикой применяемых материалов является радиационная стойкость — способность материала сохранять свои свойства в условиях ионизирующих излучений [4].

В качестве конструкционных материалов при изготовлении контейнеров для перевозки радиоактивных грузов низкой и средней активности применяют низкоуглеродистые и низколегированные коррозионно-стойкие стали, которые в процессе длительной эксплуатации подвержены радиационному набуханию и охрупчиванию [4]. Повысить эксплуатационные свойства конструкций можно за счет

of the ionizing radiation, as, for instance, steels, the radiation resistance notion is considered as a comparative characteristic of various materials behavior under the same given radiation conditions [4]. Thus, the main condition is the ability of materials to maintain the original chemical composition, structure and mechanical properties, the change of which should not exceed 20...30% in most cases.

Latest research and publications analysis. Among the protective coatings a special emphasis is put on composite ones which are filled with glass components: powders, fibers, whisker crystals, microspheres [1–8]. Most of the polymer coatings are exposed to the radiation aging, degradation, pigment washout and other radiation damages [3]. The electric arc composite coatings based on Sv-08G2C and Sv-AMg5 are new competitive type of coatings. They are filled with the hollow glass microspheres (HGM), as well as powders of sodium silicated and leaded glass of high X-ray protection properties [3, 8]. However, the coatings radiation resistance of this type has not been studied in terms of hard rays. Many radioactive waste products accumulated in the scientific and research laboratories are the spent sources of γ -radiation. That is why it is necessary to consider their influence on the structure and properties of metal-glass coatings.

THE ARTICLE AIM is a study of radiation resistance of the new electric arc composite coatings based on Sv-08G2C and Sv-AMg5 filled with the hollow glass microspheres and powders of sodium silicated and leaded glass in terms of Co^{60} γ -radiation.

Basic material. Materials and methodology of research performance. The electric arc composite coatings from Sv-08G2C (GOST 2246-70) and Sv-AMg5 (GOST 7871-75) seamless wires have been chosen. These coatings are filled with the hollow glass microspheres of sodium silicated of MC-A-9 (TU 6-48-108-94) composition, powders of sodium silicated (GOST 24315-80) and leaded (GOST 9541-75) glass obtained from household wastes. The technology and modes of coating are proposed in this work [8]. According to the accepted recommendations [7] the optimal volume content of glass filler in the coatings is $(40\pm 7)\%$. The electric arc coatings based on Sv-08G2C and Sv-AMg5 without the filler have been studied in parallel and they are obtained at the same modes. The coatings were applied from one side on the plates from St3 (GOST 380-94) of $140\times 100\times 3.5$ mm in size, in all cases the thickness of sprayed layer was 2 mm.

The Co^{60} γ -radiation is chosen in the work as the most widely used in radiology, and, therefore, it is specific for most radioactive cargoes. The irradiation of steel plates with sprayed coatings was held on the basis of SE "Radma" of the L.V. Pisarzhevskii Institute of the Physical Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine. The samples were placed in a water-filled container which was hermetically closed by the top where

нанесения на их поверхность радиационно-стойких покрытий [3, 6]. Если материалы являются перспективными для применения в широком диапазоне ионизирующих излучений, как, например, стали, понятие радиационной стойкости рассматривают как сравнительную характеристику поведения разных материалов в одинаковых заданных условиях облучения [4]. При этом главным условием остается способность материалов сохранять исходный химический состав, структуру и механические свойства, изменение которых в большинстве случаев не должно превышать 20...30%.

Анализ основных исследований и публикаций. Среди защитных покрытий особое место отводится композиционным, наполненным стеклянными компонентами: порошками, волокнами, нитевидными кристаллами, микросферами [1–8]. Большинство полимерных покрытий подвержены радиационному старению, деструкции, вымыванию пигмента и другим радиационным повреждениям [3]. Новым конкурентоспособным видом являются электродуговые композиционные покрытия на основе Sv-08Г2С и Sv-АМг5, наполненные полыми стеклянными микросферами (ПСМ), а также порошками натрийсиликатного и свинцовосодержащего стекла, обладающие высокими рентгенозащитными свойствами [3, 8]. Однако радиационная стойкость покрытий этого вида в условиях жестких излучений не изучена. Поскольку многие накопившиеся в научно-исследовательских лабораториях радиоактивные отходы представляют собой отработанные источники γ -излучений, необходимо установить их влияние на структуру и свойства металлостеклянных покрытий.

ЦЕЛЬЮ СТАТЬИ является исследование радиационной стойкости новых электродуговых композиционных покрытий на основе Sv-08Г2С и Sv-АМг5, наполненных полыми стеклянными микросферами порошками натрийсиликатного и свинцовосодержащего стекла, в условиях γ -излучений Co^{60} .

Изложение основного материала. Материалы и методика проведения исследований. Для исследований выбраны электродуговые композиционные покрытия из цельнотянутых проволок Sv-08Г2С (ГОСТ 2246–70) и Sv-АМг5 (ГОСТ 7871–75), наполненные полыми стеклянными микросферами натрийсиликатного состава MC-A-9 (ТУ 6-48-108-94), порошками натрийсиликатного (ГОСТ 24315–80) и свинцовосодержащего (ГОСТ 9541–75) стекла, полученными из бытовых отходов. Технология и режимы нанесения покрытий подробно изложены в работе [8]. Согласно принятым рекомендациям [7] оптимальное объемное содержание стеклянного наполнителя в покрытиях составляет $(40\pm 7)\%$. Параллельно исследовали электродуговые покрытия на основе Sv-08Г2С и Sv-АМг5 без наполнителя, полученные на тех же режимах. Покрытия наносили с одной стороны на пластины из Ст3 (ГОСТ 380–94) размером $140\times 100\times 3,5$ мм, толщина напыленного слоя во всех случаях составляла 2 мм.

В работе выбрано γ -излучение Co^{60} , как наиболее широко используемое в радиологии и, следовательно, характерное для большинства радиоактивных

these samples were irradiated from both sides. As sources of Co^{60} gamma-radiation such sources as GIK 7-4 of the production of the FSUE "Mayak" were used. They were placed by two in each of 30 channels, evenly placed along the irradiator perimeter. The absorbed dose was measured by means of film dosimeters of the absorbed dose of CO PD (F) 5/150 TSO 4447-8 at the surface of studied samples. The detectors were mounted at the front and back surface of the studied samples relatively to the irradiator. The power of irradiation dose D was 12.5 kGy, the E electron energy was 4.5 MeV for St3 samples based on Sv-08G2C and Sv-AMg5 filled with leaded glass. The remaining samples, i.e. the steel and aluminum electric arc coatings filled with HGM and powder of silicate glass were irradiated with a linear accelerator ILU-6 (the developer is the Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS "Russia"). The E electron energy was 2.0 MeV, the I current of electron bundle was 4 mA, and thus the absorbed D dose by samples was 100 kGy. The exposure time for all types of composite coatings was 7 hours.

The samples from the St3 of $140 \times 100 \times 1,5$ mm in size without the coating were used as the references. To assess the radiation resistance of electric arc coatings the following criteria were selected: the absence of structural and phase transitions and changes of the mechanical properties of samples from St3 coated by more than 30% [1]. The studies of coatings structure and properties were carried out at the Department of Materials Science and Technology of Metals of the National University of Shipbuilding (Mykolayiv) before and after the irradiation.

The microstructural studies were carried out by the electron and optical microscopy by means of the REMMA-102-02 electron microscope-microprobe and the MMP-2P metallographic microscope. The qualitative phase X-ray structural analysis of samples was carried out at the DRON-3 unit, the shooting of diffraction patterns was carried out from the plane section in the $Cu_{k\alpha=1,54178}$ copper radiation. The density, surface porosity, microhardness of sprayed coatings, the Vickers' hardness of steel substrate, the σ_b strength limit and σ_t yield limit of samples from St3 with coatings, the $\sigma_{отр}$ adhesion strength of coatings with the substrate were defined experimentally. The density of coatings was defined by the hydrostatic weighing; the surface porosity was studied by means of the optical microscopy using the standard techniques of quantitative metallography. The microhardness of the component phases of sprayed coatings was defined using the PMT-3 microhardness tester at a load of 20 g for the metallic matrix and 200 g for the glass inclusions. The substrate hardness from St3 was measured from the back side from the coating according to the Vickers' method on the TPP-10 device at a load of

грузов. Облучение стальных пластин с напыленными покрытиями проводили на базе ДП «Радма» Института физической химии им. Л.В. Писаржевского НАН Украины. Образцы помещали в заполненный водой контейнер, герметично закрытый крышкой, где их облучали с обеих сторон. В качестве источников гамма-излучения Co^{60} использовали источники типа ГИК 7-4 производства ФГУП ПО «Маяк», помещенные по два в каждом из 30 каналов, равномерно расположенных по периметру облучателя. Поглощенная доза на поверхности исследуемых образцов измерялась при помощи пленочных дозиметров поглощенной дозы СО ПД(Ф) 5/150 ТСО 4447-8. Детекторы крепились на фронтальной и тыльной относительно облучателя поверхности исследуемых образцов. Мощность дозы облучения D для образцов Ст3 с покрытиями на основе Св-08Г2С и Св-АМг5, наполненными свинцовосодержащим стеклом, составила 12,5 кГр, энергия пучка E — 4,5 МэВ. Остальные образцы, т. е. стальные и алюминиевые электродуговые покрытия, наполненные ПСМ и порошком натрийсиликатного стекла, облучали с помощью линейного ускорителя ИЛУ-6 (разработчик — Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СВ РАН «Россия»). Энергия пучка $E = 2,0$ МэВ, ток $I = 4$ мА, при этом поглощенная образцами доза D составила 100 кГр. Время экспозиции для всех видов композиционных покрытий — 7 часов.

В качестве эталонов использовали образцы из Ст3 размером $140 \times 100 \times 1,5$ мм без покрытия. Для оценки радиационной стойкости электродуговых покрытий выбраны следующие критерии: отсутствие структурно-фазовых превращений и изменения механических свойств образцов из Ст3 с нанесенными покрытиями более чем на 30% [1]. Исследования структуры и свойств покрытий до и после облучения проводили на кафедре материаловедения и технологии металлов Национального университета кораблестроения (г. Николаев).

Микроструктурные исследования осуществляли методами электронной и оптической микроскопии при помощи электронного микроскопа-микроанализатора РЭММА-102-02 и металлографического микроскопа MMP-2P. Качественный фазовый рентгеноструктурный анализ образцов выполняли на установке ДРОН-3, съемка дифрактограмм проводилась с плоских шлифов в излучении меди $Cu_{k\alpha=1,54178}$. Экспериментально определяли плотность, поверхностную пористость, микротвердость напыленных покрытий, твердость по Виккерсу стальной подложки, предел прочности σ_b и предел текучести σ_t образцов из Ст3 с покрытиями, прочность сцепления покрытий $\sigma_{отр}$ с подложкой. Плотность покрытий определяли гидростатическим взвешиванием, поверхностную пористость исследовали с помощью оптической микроскопии, применяя стандартные методики количественной металлографии. Микротвердость составляющих фаз напыленных покрытий определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 20 г для металлической матрицы и 200 г для стеклянных включений. Твердость подложки из Ст3 измеряли с оборотной стороны от покрытия

5 kg; the measurement error did not exceed $\pm 10\%$. The adhesion strength of coatings with a thickness of 2 mm with a steel substrate was defined according to the GOST 28574-90 and GOST 14760-69*. The IR 5057-50 testing machine was used to measure the breaking strength limit of the samples from St3, the yield limit, the adhesive strength of coatings with the substrate. The loading rate was 2.5 mm/min.

The results of experimental research (Table 1)

по методу Виккерса на приборе ТПП-10 при нагрузке 5 кг; погрешность измерений не превысила $\pm 10\%$. Прочность сцепления покрытий толщиной 2 мм со стальной подложкой определяли по ГОСТ 28574-90 и ГОСТ 14760-69*. Для измерения предела прочности образцов из Ст3 на разрыв, предела текучести, прочности сцепления покрытий с подложкой использовали испытательную машину ИР 5057-50, скорость нагружения составляла 2,5 мм/мин.

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 1.

Table 1. Physical and Mechanical Properties of Steel Plates with Coatings before and after Irradiation

Таблица 1. Физико-механические свойства стальных пластин с покрытиями до и после облучения

Properties Свойства	Filler in Coating / Наполнитель в покрытии			
	Coating without filler Покрытие без наполнителя	Hollow Glass Microspheres Полые стеклянные микросферы	Soluble Potassium Natрийсиликатное стекло	Plumbiferous Glass Свинцово- содержащее стекло
	Electric Arc Coatings from Sv-08G2S of 2 mm thickness Электродуговые покрытия из Св-08Г2С толщиной 2 мм			
Density, kg/m^3 / Плотность, $кг/м^3$: <i>before irradiation</i> / до облучения <i>after irradiation</i> / после облучения	7055 6995	5800 5715	7025 7025	6065 6065
Surface Porosity, %: Поверхностная пористость, %: <i>before irradiation</i> / до облучения <i>after irradiation</i> / после облучения	17 25	19 20	20 20	22 22
Medium Size of Pores, μm : Средний размер пор, μm : <i>before irradiation</i> / до облучения <i>after irradiation</i> / после облучения	6,5...8,0 11,1...14,5	5,0...7,6 4,5...7,0	5,2...6,6 4,5...6,5	3,9...5,4 3,5...5,0
Microhardness of Coatings before irradiation, MPa: Микротвердость покрытий до облучения, МПа: $H_{\mu 20}$ of matrix / $H_{\mu 20}$ матрицы $H_{\mu 200}$ of glass / $H_{\mu 200}$ стекла	1280 –	1325 1250	1300 1400	1310 1370
Microhardness of Coatings after irradiation, MPa: Микротвердость покрытий после облучения, МПа: $H_{\mu 20}$ of matrix / $H_{\mu 20}$ матрицы $H_{\mu 200}$ of glass / $H_{\mu 200}$ стекла	2855 –	2645 1310	3335 1500	1925 1420
	St3 with Coating from Sv-08G2S of 2 mm thickness Ст3 с покрытием из Св-08Г2С толщиной 2 мм			
Breaking Strength Limit σ_b , MPa: Предел прочности на разрыв σ_b , МПа: <i>before irradiation</i> / до облучения <i>after irradiation</i> / после облучения	323,0 328,0	315,0 318,0	344,0 350,0	318,0 320,0
Yield Limit σ_y , MPa: Предел текучести σ_y , МПа: <i>before irradiation</i> / до облучения <i>after irradiation</i> / после облучения	265,0 275,0	260,0 280,5	275,0 285,0	260,0 278,0
Adhesive Strength, $\sigma_{отр}$, MPa: Прочность сцепления, $\sigma_{отр}$, МПа: <i>before irradiation</i> / до облучения <i>after irradiation</i> / после облучения	25,0 26,0	20,0 22,0	27,0 29,2	15,0 15,0

Continuation of table 1. / Продолжение табл. 1

Properties Свойства	Filler in Coating / Наполнитель в покрытии			
	Coating without filler Покрытие без наполнителя	Hollow Glass Microspheres Полые стеклянные микросферы	Soluble Potassium Silicate Натрийсиликатное стекло	Plumbiferous Glass Свинцово- содержащее стекло
	<i>Electric Arc Coatings from Sv-AMg5 of 2 mm thickness</i> Электродуговые покрытия из Св-АМг5 толщиной 2 мм			
Density, kg/m ³ / Плотность, кг/м ³ :				
before irradiation / до облучения	1700	1480	1770	1860
after irradiation / после облучения	1695	1480	1665	1860
Surface Porosity, %: Поверхностная пористость, %:				
before irradiation / до облучения	12	22	20	18
after irradiation / после облучения	26	25	22	20
Medium Size of Pores, μm : Средний размер пор, мкм:				
before irradiation / до облучения	2,4 – 2,7	2,1 – 3,5	1,9 – 2,0	2,2 – 3,6
after irradiation / после облучения	3,5 – 5,0	4,0 – 6,5	2,0 – 2,5	4,0 – 6,5
Microhardness of Coatings before irradiation, MPa: Микротвердость покрытий до облучения, МПа:				
$H_{\mu 20}$ of matrix / $H_{\mu 20}$ матрицы	345	375	355	365
$H_{\mu 200}$ of glass / $H_{\mu 200}$ стекла	-	1270	1420	1340
Microhardness of Coatings after irradiation, MPa: Микротвердость покрытий после облучения, МПа:				
$H_{\mu 20}$ of matrix / $H_{\mu 20}$ матрицы	925	960	925	925
$H_{\mu 200}$ of glass / $H_{\mu 200}$ стекла	-	1280	1480	1350
	<i>St3 with Coating from Sv-AMg5 of 2 mm thickness</i> Ст3 с покрытием из Св-АМг5 толщиной 2 мм			
Breaking Strength Limit σ_b , MPa: Предел прочности на разрыв σ_b , МПа:				
before irradiation / до облучения	327,0	328,0	338,18	336,15
after irradiation / после облучения	341,0	340,0	350,0	342,5
Yield Limit σ_y , MPa: Предел текучести σ_y , МПа:				
before irradiation / до облучения	268,0	266,0	287,0	284,0
after irradiation / после облучения	288,70	287,0	300,0	290,0
Adhesive Strength, $\sigma_{\text{отр}}$, MPa: Прочность сцепления, $\sigma_{\text{отр}}$, МПа:				
before irradiation / до облучения	19,0	15,0	16,0	15,0
after irradiation / после облучения	20,0	16,0	16,5	16,0

The research of properties of reference samples from St3 showed that there is a non-significant increase of strength characteristics in the result of irradiation of the $E = 2,0$ MeV electrons by the energy: the HV_5 Vickers' hardness before irradiation was 1460 MPa, the σ_y tensile ultimate strength was 365 MPa, the σ_y yield limit was 292,5 MPa, and it agrees with the data [4]; after the irradiation the HV_5 was 1485 MPa, the σ_b was 371,0 MPa, the σ_t was 302,5 MPa. The results of microscopic research (Fig. 1, a) and X-ray structure analysis did not show any structural and phase changes and agree with the data of research [4].

The microstructures of electric arc coatings on the basis of Sv-08G2S and Sv-AMg5 without the filler are

Исследования свойств эталонных образцов из Ст3 показали, что в результате облучения энергией электронов $E = 2,0$ МэВ наблюдается незначительное увеличение прочностных характеристик: твердость по Виккерсу HV_5 до облучения составляла 1460 МПа, предел прочности при растяжении $\sigma_b = 365$ МПа, предел текучести $\sigma_t = 292,5$ МПа, что совпадает с данными [4]; после облучения $HV_5 = 1485$ МПа, $\sigma_b = 371,0$ МПа, $\sigma_t = 302,5$ МПа. Результаты микроскопических исследований (рис. 1, а) и рентгеноструктурного анализа не показали структурно-фазовых изменений и совпадают с данными работы [4].

На рис. 1 представлены также микроструктуры электродуговых покрытий на основе Св-08Г2С и Св-АМг5 без наполнителя. Результаты

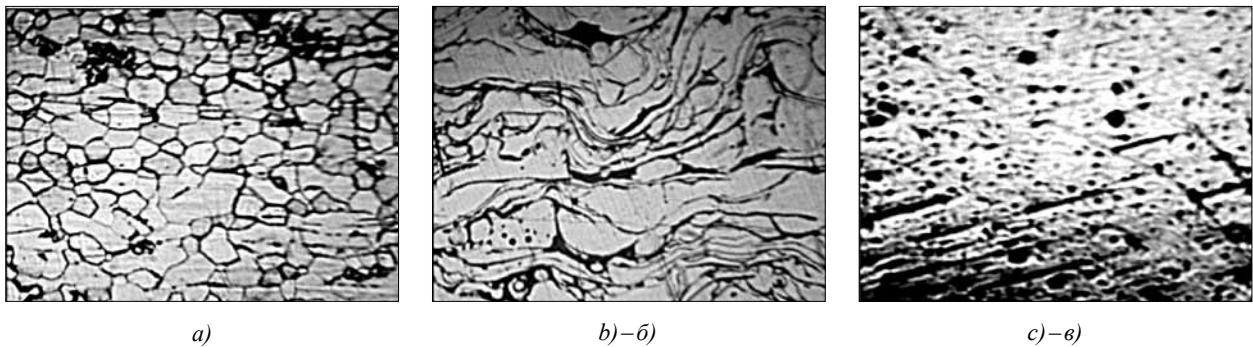


Fig. 1. Microstructure of Samples after Irradiation (the E electron energy is 2.0 MeV, the D absorbed dose of irradiation is 100 kGy):
Рис. 1. Микроструктуры образцов после облучения ($E = 2,0$ МэВ, $D = 100$ кГр):

a) — *is St3* ($\times 370$) / *Ст3* ($\times 370$); *b)–б)* — *is coatings on the basis of Sv-08G2S* ($\times 370$) / *покрытия на основе Св-08Г2С* ($\times 370$);
c)–в) — *is coatings on the basis of Sv-AMg5* ($\times 100$) / *покрытия на основе Св-АМг5* ($\times 100$)

demonstrated in Fig. 1. The results of microstructural research showed the two times increase of coatings surface porosity on the basis of Sv-AMg5, the size of pores increased by 40...50%. The coatings surface porosity on the basis of Sv-08G2S increased by 47%, the size of pores increased by 70%. All these characteristics are connected with the thermal impact on the materials of the Co^{60} γ -radiation, which is able to change the surface morphology. The results of X-ray structural analysis confirmed the absence of structural and phase changes. The tests which were carried out did not show any significant changes in the mechanical properties of samples from St3 with coatings from Sv-08G2S and Sv-AMg5. However, the $H_{\mu_{20}}$ microhardness of coatings doubles due to the effect of the surface hardening [1, 2].

The microstructures of electric arc coatings on the basis of Sv-08G2S and Sv-AMg5 filled with the PGM and silicated glass are demonstrated in Fig. 2.

The microstructural studies have shown that the specific feature of glass and metal coatings based on Sv-08G2S and Sv-AMg5 is a slight increase of the surface porosity (compared to the coatings without filler), due to the features of their structure: the glass inclusions are the stress raisers [8] with which the heat losses and energy output processes occur at the interface. The dimensions of coatings microhardness have shown that the surface hardening of metal and glass coatings occurs in case of the Co^{60} γ -rays irradiation with the E energy which is 2.0 MeV due to the thermal processes: the $H_{\mu_{20}}$ microhardness of matrix of coatings based on Sv-08G2S is increased almost twice, the microhardness of matrix of coatings from Sv-AMg5 is increased in 2.5 times. The $H_{\mu_{200}}$ microhardness of glass inclusions is almost unchanged due to their high heat resistance [7, 8]. The results of X-ray structural analysis did not show any structural and phase changes. The tests did not show any significant changes of mechanical properties of samples from St3 with the applied metal and glass coatings.

The prospects of coatings appliance filled with leaded glass [1] caused the necessity of irradiation at higher energies. So, the electric arc coatings on the basis of Sv-08G2S and Sv-AMg5 filled with the leaded glass are

микроструктурных исследований показали увеличение поверхностной пористости покрытий на основе Св-АМг5 почти вдвое, размеров пор — на 40...50%. Поверхностная пористость покрытий на основе Св-08Г2С в среднем увеличилась на 47%, размер пор — на 70%, что связано с тепловым воздействием на материалы γ -излучения Co^{60} , способного изменить морфологию поверхности. Результаты рентгеноструктурного анализа свидетельствуют об отсутствии структурно-фазовых изменений. Проведенные испытания не показали существенных изменений механических свойств образцов из Ст3 с покрытиями из Св-08Г2С и Св-АМг5, однако при этом вдвое увеличивается микротвердость матрицы покрытий $H_{\mu_{20}}$, что связано с эффектом поверхностного упрочнения [1, 2].

На рис. 2 приведены микроструктуры электродуговых покрытий на основе Св-08Г2С и Св-АМг5, наполненных ПСМ и натрийсиликатным стеклом.

Проведенные микроструктурные исследования показали, что отличительной особенностью металлостеклянных покрытий на основе Св-08Г2С и Св-АМг5 является незначительное, по сравнению с покрытиями без наполнителя, увеличение поверхностной пористости, что связано с особенностями их структуры: стеклянные включения являются концентраторами напряжений [8], на поверхности раздела с которыми происходят тепловые потери и процессы энерговыделения. Измерения микротвердости покрытий показали, что в результате облучения γ -лучами Co^{60} с энергией $E = 2,0$ МэВ вследствие тепловых процессов происходит поверхностное упрочнение металлостеклянных покрытий: микротвердость $H_{\mu_{20}}$ матрицы покрытий на основе Св-08Г2С увеличивается почти вдвое, матрицы покрытий из Св-АМг5 — в 2,5 раза. Микротвердость $H_{\mu_{200}}$ стеклянных включений практически не изменяется, что связано с их высокой теплоустойчивостью [7, 8]. Результаты рентгеноструктурного анализа свидетельствуют об отсутствии структурно-фазовых изменений. Испытания не показали существенного изменения механических свойств образцов из Ст3 с нанесенными металлостеклянными покрытиями.

Перспективы применения покрытий, наполненных свинцовосодержащим стеклом [1], вызвали

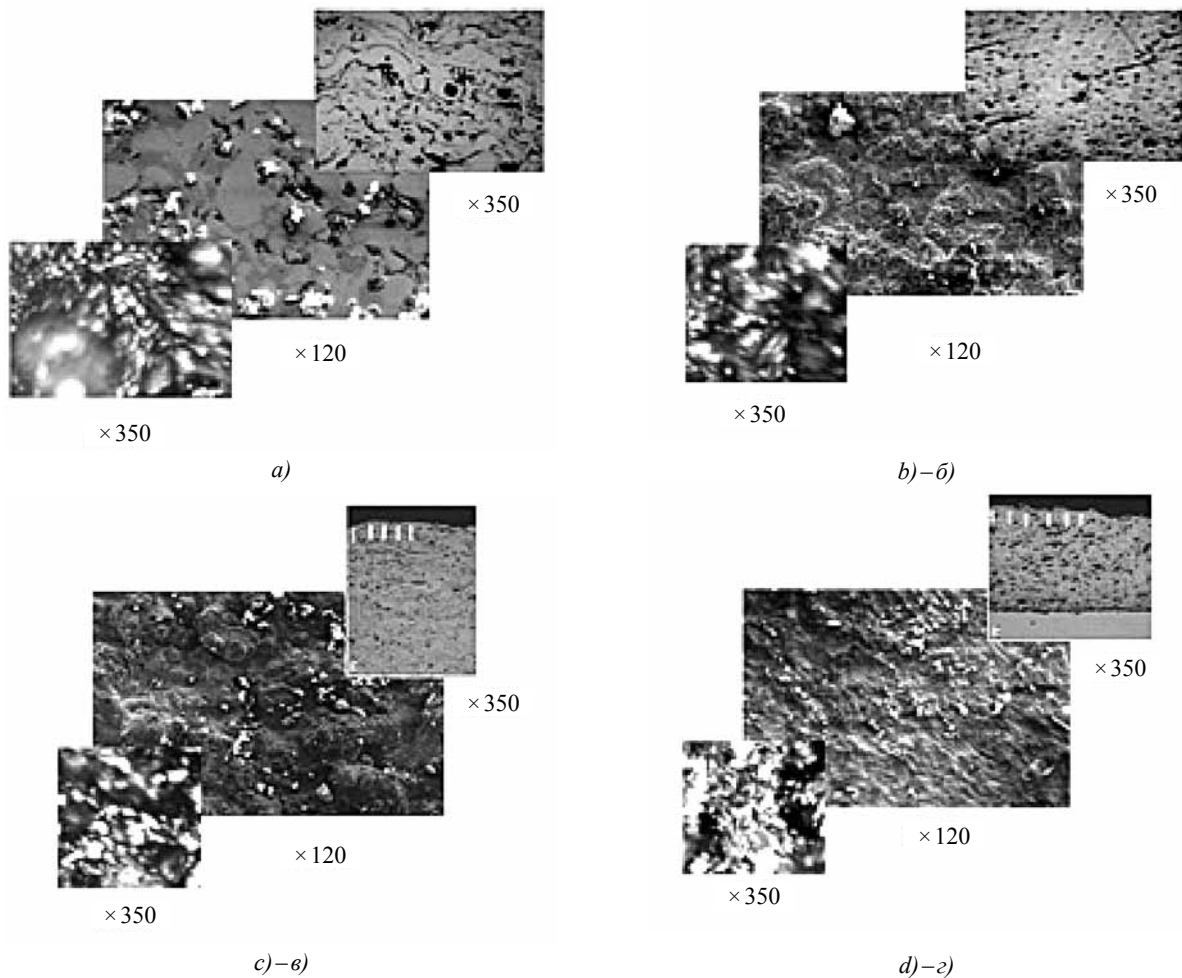


Fig. 2. Microstructures of Electric Arc Coatings after Irradiation (the E electron energy is 2.0 MeV, the D absorbed radiation dose is 100 kGy):

Рис. 2. Микроструктуры электродуговых покрытий после облучения ($E = 2,0$ МэВ, $D = 100$ кГр):

a) — *is Sv-08G2S-PGM/Св-08Г2С-ПСМ*; *b)–б)* — *is Sv-AMg5-PGM/Св-АМг5-ПСМ*; *c)–в)* — *is Sv-08G2S-silicated glass/Св-08Г2С-натрийсиликатное стекло*; *d)–д)* — *is Sv-AMg5-silicated glass/Св-АМг5-натрийсиликатное стекло*

irradiated by the E energy of electrons which is 4.5 MeV. Their microstructures are shown in Fig. 3.

The studies of microstructure and phase composition have shown the stability of the coatings structure from Sv-08G2S (the leaded glass composition) in the Co^{60} γ -ray irradiation process with the E energy which is 4.5 MeV over a period of 7 hours: the structural and phase changes do not occur, the increase of surface porosity and pore sizes is not observed. The dimensions of microhardness showed the increase of $H_{\mu_{20}}$ of steel matrix of metal and glass coating based on Sv-08G2S by 46% and the increase of $H_{\mu_{20}}$ of aluminum matrix of coating based on Sv-AMg5 nearly in 2.5 times; the $H_{\mu_{20}}$ microhardness of glass inclusions remains constant. The test results did not show a significant change of the mechanical properties of samples from St3 with electric arc coatings.

The samples from St3 with metal and glass electric arc coatings based on Sv-08G2S and Sv-AMg5 maintain the mechanical properties stable in the result of the diffusional radiation by the Co^{60} γ -rays with the E electron energy which is 2.0; 4.5 MeV. These mechanical properties

необходимость облучения на более высоких энергиях. Так, электродуговые покрытия на основе Св-08Г2С и Св-АМг5, наполненные свинцово-содержащим стеклом, облучены энергией электронов $E = 4,5$ МэВ, их микроструктуры представлены на рис. 3.

Проведенные исследования микроструктуры и фазового состава показали стабильность структуры покрытий из композиции Св-08Г2С – свинцовосодержащее стекло в процессе облучения γ -лучами Co^{60} с энергией $E = 4,5$ МэВ в течение 7 часов: структурно-фазовые изменения не происходят, увеличения поверхностной пористости и размеров пор не наблюдается. Измерения микротвердости показали увеличение $H_{\mu_{20}}$ стальной матрицы металлостеклянного покрытия на основе Св-08Г2С на 46% и увеличение почти в 2,5 раза $H_{\mu_{20}}$ алюминиевой матрицы покрытия на основе Св-АМг5; микротвердость $H_{\mu_{20}}$ стеклянных включений остается постоянной. Результаты испытаний не показали существенного изменения механических свойств образцов из Ст3 с электродуговыми покрытиями.

В результате диффузионного облучения γ -лучами Co^{60} с энергией электронов $E = 2,0; 4,5$ МэВ

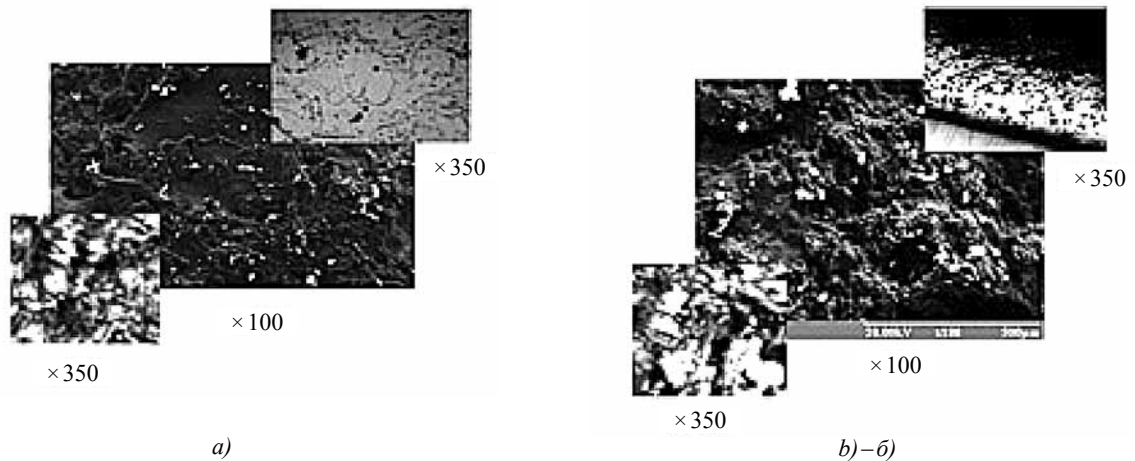


Fig. 3. Microstructure of Coatings Filled with Leaded Glass after Irradiation (the E energy electrons which is 4.5 MeV, the D absorbed dose is 12.5 kGy):

Рис. 3. Микроструктура покрытий, наполненных свинцовосодержащим стеклом, после облучения ($E = 4,5$ МэВ, $D = 12,5$ кГр):

a) — *is Sv-08G2S / Cв-08Г2С*; *b)–б)* — *is Sv-AMg5 / Cв-AMг5*

are the σ_b tensile ultimate strength, the σ_y yield limit and the strength of coatings adhesion with the $\sigma_{ор}$ substrate, the HV_5 hardness of the substrate from St3 increases by 15% at the average.

The impact of the Co^{60} γ -radiation on metal and glass electric arc coatings can be assessed by the qualitative comparison (Fig. 4) with samples from pure lead and other composite materials filled with the leaded glass. The assessment criterion is the multiplicity of attenuation of γ -radiation diffusion flux by the samples. In this case, this value is the ratio of the D_0 radiation dose power

образцы из Ст3 с металлостеклянными электродуговыми покрытиями на основе Св-08Г2С и Св-AMг5 сохраняют стабильными механические свойства: предел прочности при растяжении σ_b , предел текучести σ_t и прочность сцепления покрытий с подложкой $\sigma_{ор}$, твердость HV_5 подложки из Ст3 в среднем возрастает на 15%.

Воздействие γ -излучения Co^{60} на металлостеклянные электродуговые покрытия можно оценить путем качественного сравнения (рис. 4) с образцами из чистого свинца и других композиционных

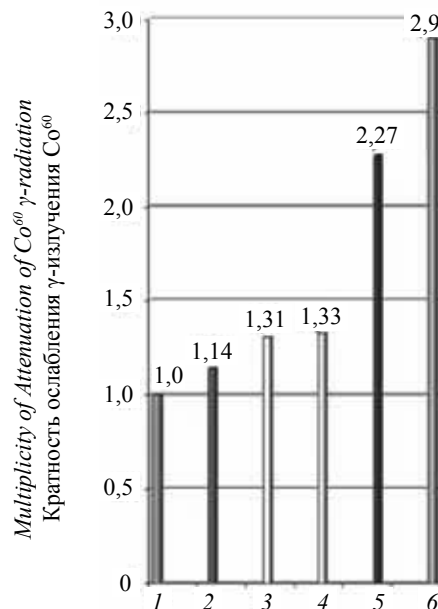


Fig. 4. Multiplicity of Attenuation of Co^{60} γ -radiation by Composite Materials and Coatings Filled with the Leaded Glass:

Рис. 4. Кратность ослабления γ -излучения Co^{60} композиционными материалами и покрытиями, наполненными свинцовосодержащим стеклом:

1 — *is St3 without a coating / Ст3 без покрытия*; *2* — *is St3 with a coating based on Sv-08G2S / Ст3 с покрытием на основе Св-08Г2С*; *3* — *is the TPh-10 fiberglass / стеклоткань ТФ-10*; *4* — *is the phenol-formaldehyde leaded fiberglass / фенолоформальдегидная свинцовосодержащая стеклоткань*; *5* — *is St3 with a coating based on Sv-AMg5 / Ст3 с покрытием на основе Св-AMг5*; *6* — *is the lead plate / пластина свинца*

preceding the sample to the D power dose measured according to the sample: $\hat{E} = D_0/D$. As the reference sample the steel plate from St3 without a coating was used. The multiplicity of attenuation was accepted as the unit.

The data on the following composite materials are plotted on the histogram: the fiberglass with a thickness of 7.9 mm of the TF-10 brand (sample 3) with the multiplicity of the 1.31 attenuation; the phenol-formaldehyde leaded fiber-glass (sample 4) with a thickness of the 8.2 mm with a multiplicity of 1.33 attenuation; the plate of pure lead with a density of 11340 kg/m³, with a thickness of 7.9 mm (sample 6) and with a multiplicity of the 2.9 attenuation.

The qualitative assessment showed that the effect from the application of coating layer of composition of Sv-08G2S (the leaded glass) with a thickness of 2 mm on the steel plate is that it protects the St3 plate by 28% and the coatings of composition of Sv-AMg5 (the leaded glass) protects it by 56%. It is directly connected with the properties of metal matrix of compositions. The advantage of usage the aluminum matrix composite materials for protection against the types of ionizing radiation is determined by the relatively low absorption of thermal neutrons by the aluminum matrix, high thermal conductivity, suitable corrosion resistance and processing characteristics [3].

Using the experimental results based on Beer-Lambert law [4], one can define the lead equivalent for the samples from St3 with metal and glass coating, or, to be more precise, the protection thickness, which attenuate the radiation in the same way as the given layer of lead. The value of lead equivalent depends directly on the radiation type and energy and it also depends on the multiplicity of attenuation. Thus, within experimental conditions the lead equivalent for the sample from St3 with a thickness of 2.5 mm with a coating filled with the lead glass is 0.972 mm_{pb}, for compositions based on Sv-08G2S; it is 6.08 mm_{pb} for coatings based on Sv-AMg5. The obtained dimensionless quantities are 0.216 and 1.350 in terms of the specific values related to the thickness.

The prospects for further research are connected with the research of thermo-mechanical processes in irradiated composite layer of the constructions of the floating structures for transportation and storage of radioactive substances.

CONCLUSION. 1. As a result of diffusional effect of the Co⁶⁰ γ -radiation with the E electron energy which is 2.0; 4.5 MeV the structural and phase transitions does not occur in electric arc metal and glass coatings on the basis of Sv-08G2S and Sv-AMg5 and the irradiation process is accompanied by the surface hardening: the microhardness of metal matrix of coatings increases in 2 ... 2.5 times, the surface porosity almost does not increase in contrast to the unfilled coatings.

материалов, наполненных свинцовосодержащим стеклом. Критерием оценки принята кратность ослабления диффузионного потока γ -излучения образцами. В данном случае эта величина представляет собой отношение мощности дозы излучения D_0 перед образцом к мощности дозы D , измеренной за образцом: $\hat{E} = D_0/D$. В качестве эталонного образца использовали стальную пластину из Ст3 без покрытия, приняв кратность ослабления за единицу.

На гистограмму нанесены данные по следующим композиционным материалам: стеклоткань толщиной 7,9 мм марки TF-10 (образец 3) с кратностью ослабления 1,31; фенолоформальдегидная свинцовосодержащая стеклоткань (образец 4) толщиной 8,2 мм с кратностью ослабления 1,33; пластинка чистого свинца плотностью 11340 кг/м³, толщиной 7,9 мм (образец 6) и кратностью ослабления 2,9.

Проведенная качественная оценка показывала, что эффект от нанесения на стальную пластину слоя покрытия композиции Св-08Г2С – свинцовосодержащее стекло толщиной 2 мм заключается в том, что оно на 28% защищает пластину Ст3, а покрытия композиции Св-АМг5 – свинцовосодержащее стекло — на 56% — это непосредственно связано со свойствами металлической матрицы композиций. Преимущество применения алюмоматричных композиционных материалов для защиты от видов ионизирующих излучений обусловлено сравнительно малым поглощением тепловых нейтронов алюминиевой матрицей, высокой теплопроводностью, хорошей коррозионной стойкостью и технологическими свойствами [3].

Используя экспериментальные результаты на основании закона Бэра–Ламберта [4], можно определить свинцовый эквивалент для образцов из Ст3 с металлостеклянным покрытием — толщину защиты, ослабляющей излучение в той же мере, что и данный слой свинца. Значение свинцового эквивалента непосредственно зависит от вида и энергии излучения, а также кратности ослабления. Таким образом, в пределах условий эксперимента свинцовый эквивалент для образца из Ст3 толщиной 2,5 мм с покрытием, наполненным свинцовосодержащим стеклом, составляет 0,972 мм_{pb} для композиций на основе Св-08Г2С; 6,08 мм_{pb} для покрытий на основе Св-АМг5. В пересчете на удельные значения, отнесенные к толщине, полученные безразмерные величины составляют 0,216 и 1,350.

Перспективы дальнейших исследований связаны с исследованиями термомеханических процессов в облученном композиционном слое конструкций плавучих сооружений для перевозки и хранения радиоактивных веществ.

ВЫВОДЫ. 1. В результате диффузионного воздействия γ -излучения Co⁶⁰ с энергией пучка $E = 2,0; 4,5$ МэВ в электродуговых металлостеклянных покрытиях на основе Св-08Г2С и Св-АМг5 не происходит структурно-фазовых превращений и процесс облучения сопровождается поверхностным упрочнением: микротвердость металлической матрицы покрытий возрастает в 2...2,5 раза; в отличие от непористых покрытий поверхностная пористость практически не увеличивается.

2. Under the absorption of the D radiation dose which is 12.5 kGy and 100 kGy the samples from St3 with metal and glass electric arc coatings on the basis of Sv-08G2S and Sv-AMg5 remain the mechanical properties stable: the σ_v tensile ultimate strength, the σ_y yield stress and the $\sigma_{отр}$ adhesion strength of coatings with the substrate.

3. In the conditions of the Co^{60} γ -rays irradiation with the E electron energy which is 4.5 MeV the values of lead equivalent for St3 with metal and glass coatings filled with the lead glass related to the thickness of the samples equal to 0.216 for the coatings based on Sv-08G2S and 1.350 for coatings based on Sv-AMg5.

4. It is stated that the coating layer of composition of Sv-08G2S (the leaded glass) with a thickness of 2 mm increases the multiplicity of attenuation of St3 by 28%, and the layer of coatings of composition of Sv-AMg5 (the leaded glass) increases by 56%.

2. При поглощении дозы излучений D 12,5 кГр и 100 кГр образцы из Ст3 с металлостеклянными электродуговыми покрытиями на основе Св-08Г2С и Св-АМг5 сохраняют стабильными механические свойства: предел прочности при растяжении σ_v , предел текучести σ_t и прочность сцепления покрытий с подложкой $\sigma_{отр}$.

3. В условиях облучения γ -лучами Co^{60} с энергией пучка $E = 4,5$ МэВ значения свинцового эквивалента для Ст3 с металлостеклянными покрытиями, наполненными свинцовосодержащим стеклом, отнесенные к толщине образцов, составляют 0,216 для покрытий на основе Св-08Г2С и 1,350 — для покрытий на основе Св-АМг5.

4. Установлено, что слой покрытия композиции Св-08Г2С–свинцовосодержащее стекло толщиной 2 мм повышает кратность ослабления Ст3 на 28%, а покрытия композиции Св-АМг5–свинцовосодержащее стекло — на 56%.

Список литературы

- [1] **Зеленский, В.Ф.** Радиационные дефекты и набухание металлов [Текст] / В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, Т.П. Черняева. — К. : Наукова думка, 1988. — 296 с.
- [2] Изменение структуры и сверхпластичных свойств пластин алюминиевых сплавов воздействием импульсного пучка релятивистских электронов [Текст] / В.Ф. Клепиков, В.В. Брежовский, А.В. Пойда, В.В. Литвиненко, В.П. Пойда, В.Ф. Кивник, В.Т. Уваров // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (84). — 2003. — № 6. — С. 86–88.
- [3] **Павленко, В.И.** Основные аспекты разработки современных радиационно-защитных конструкционных металлокомпозитных материалов [Текст] / В.И. Павленко, П.В. Матюхин // Современные наукоемкие технологии. — 2005. — № 20. — С. 85–86.
- [4] **Пикаев, А.К.** Современная радиационная химия. Основные положения. Экспериментальная техника и методы [Текст] / А.К. Пикаев. — М. : Наука, 1985. — 375 с.
- [5] **Погребняк, А.Д.** Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях и свойства металлических материалов после импульсного воздействия пучков частиц [Текст] / А.Д. Погребняк, О.П. Кульментаева // ФИПФИПРСЕ. — 2003. — Т. 1, № 2. — С. 108–136.
- [6] Свинцевомістке скловолокно для радіаційнозахисних композитів [Текст] / Л.Р. Вишняков, Т.В. Грудіна, В.Д. Горобинська, О.П. Яременко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2007. — № 1. — С. 97–100.
- [7] **Фарионова, Т.А.** Выбор состава композиционных материалов и покрытий технических средств для перевозки опасных грузов на основе экспертных оценок [Электронный ресурс] / Т.А. Фарионова, Ю.А. Казимиренко // Вісник НУК. — Миколаїв : НУК, 2010. — № 5. — Режим доступа: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [8] Формирование ультрадисперсной структуры в композиционных электродуговых покрытиях, наполненных полыми стеклянными микросферами [Электронный ресурс] / Ю.А. Казимиренко, А.А. Карпеченко, А.А. Жданов, К.О. Тумаков // Вісник НУК. — Миколаїв : НУК, 2012. — № 3. — Режим доступа: <http://ev.nuos.edu.ua>.

© Ю. А. Казимиренко, В. В. Шлапацкая

Статью рекомендует в печать
д-р техн. наук, проф. А. Н. Дубовой



КНИЖНАЯ ПОЛКА



Рассмотрены процессы изготовления порошков, процессы формования заготовок из порошков, процессы спекания изделий из порошков, дополнительная обработка порошковых материалов.

В учебнике проанализированы недостатки традиционных технологических процессов и обоснованы пути их совершенствования, приведены систематизированные данные о высокоэнергетических процессах производства порошков, формования и спекания заготовок, описаны закономерности формирования структуры и свойств порошковых материалов.

