

УДК 504.5:504.6:621.791

Д.А. Кузнецов, М.Н. Игнатов, А.М. ИгнатоваПермский национальный исследовательский
политехнический университет**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТВЕРДОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СВАРОЧНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ**

Сварочные аэрозоли – один из негативных факторов, влияющих на здоровье рабочих-сварщиков, именно поэтому вопрос их всестороннего изучения является актуальным. Твердая составляющая сварочных аэрозолей представляет собой мелкодисперсные частицы, которые при вдыхании могут остаться в организме человека и стать причиной снижения работоспособности и развития хронических заболеваний. В особенности работы, посвященные твердой составляющей сварочных аэрозолей, популярны за рубежом, поскольку оценка нанесенного вреда здоровью непосредственно влияет на показатели эффективности предприятия и размер выплат по страховым обязательствам. В отечественной печати публикации, как правило, освящают медицинскую сторону вопроса и содержат данные уже проведенных исследований. В отличие от них данная работа посвящена обзору физико-химических методов исследований твердых составляющих сварочных аэрозолей, здесь представлены наиболее современные данные растровой электронной сканирующей микроскопии, фотонной корреляционной спектроскопии и рентгеноспектрального микрозондового анализа применительно к исследованию твердых составляющих сварочных аэрозолей. Представлены примеры данных и даны рекомендации, как они могут быть интерпретированы. Работа написана на основе практического опыта авторов, который позволил сформулировать не только подход к выбору методов для исследования, но и разработать методику отбора проб, которая также представлена в статье.

Ключевые слова: ручная дуговая сварка, сварочные аэрозоли, твердая составляющая сварочных аэрозолей, производительность труда, растровая электронная сканирующая микроскопия, фотонная корреляционная спектроскопия, рентгеноспектральный микрозондовый анализ, охрана труда, методы анализа, пробоотбор.

D.A. Kuznecov, M.N. Ignatov, A.M. Ignatova

Perm National Research Polytechnic University

**PHYSICS-CHEMICAL METHODS OF STUDIES
OF SOLID PART WELDING FUMES**

The welding fumes is one of the worst aspects which influence to health of welders, in that reason the question of study that substance is very important. The solid of welding fumes consist from fine particles of different size and shape, which can stay in lung and other tissues of human body in long time, it can be provocateur reduce of labor productivity and can be reason of professional illness. The studies about solid part of welding fumes very popular in English language science press because influence to evaluation of effectivity manufacturing and volume of insurance for workers. In Russian science press papers about this topic usually describe results of individual studies or show only medical aspects. In differences from that papers, this show review of the most modern methods of studies solid part of welding fumes – scan-

ning electron scanning microscopy, photon correlation spectroscopy, X-ray microprobe analysis, examples of results and recommendation for understanding of results. All question which was described in paper produced on base practical experience of authors and it giving useful information for different readers and give important information about sampling of solid part welding fumes.

Keywords: manual arc welding, welding fumes, solid part of welding fumes, productivity, scanning electron scanning microscopy, photon correlation spectroscopy, X-ray microprobe analysis, labor protection, methods of analysis, sampling.

Условия работы сварщиков с точки зрения трудового законодательства признаются неблагоприятными для здоровья, по причине высокой востребованности сварочных работ работники данной специальности имеют определенные льготы со стороны трудового законодательства [1]. Эти особые условия являются не предупредительными, а компенсирующими мерами, которые не способствуют снижению риска профессиональных заболеваний.

Профессиональные заболевания сварщиков – это прежде всего различные легочные заболевания, среди которых есть такие тяжелые, как астма, рак легких и т.д. Одним из наиболее распространенных типов сварочных работ является ручная дуговая сварка покрытыми электродами. Согласно данным, полученным американским Центром защиты прав рабочих [2], у сварщиков, занятых на работах по ручной дуговой сварке, фиксируются такие острые симптомы, как повышение температуры (47 % респондентов), появление кашля (80 %), головные боли (78 %) и образование мокроты, загрязненной включениями аэрозолей (76 %). Согласно тому же исследованию среди хронических симптомов отмечаются легочная недостаточность (17 % опрошенных), кардиологические проблемы (11 %), ухудшение эмоционального состояния (7 %), болезненность суставов (63 %), раздражительность и утомляемость (62 %), перепады настроения (54 %), а также кратковременное ухудшение памяти (78 %).

Ряд отечественных и зарубежных исследователей утверждают, что одной из основных причин негативного воздействия на организм человека при сварочных работах являются сварочные аэрозоли. Концентрация сварочных аэрозолей в рабочей зоне является основным критерием при оценке условий труда сварщиков. Контроль на рабочих местах показывает, что для разных рабочих цеха и для работников одной специализации, но в разное время года существует очень широкий диапазон уровней средней концентрации сварочных аэрозолей и газов в зоне дыхательного контакта. Средние значения концентрации могут отличаться на несколько порядков даже в течение короткого промежутка времени, а пиковые отличаются от фоновых в сотни раз.

На величину средних и мгновенных показателей концентрации влияет множество факторов. Конечно, прежде всего важно, какое именно количество времени рабочий выполняет непосредственно сварочные работы, т.е. какова доля времени горения дуги от общего времени рабочей смены, для ручной дуговой сварки она может составлять 30 %, а для некоторых видов автоматической сварки – до 90 %¹. Таким образом, тезис о том, что при автоматизации сварки ее вредное воздействие снижается, не является абсолютно верным.

Для снижения загрязнения воздуха рабочей зоны используется местная и общая вентиляция, а для очистки непосредственно вдыхаемого воздуха используются средства индивидуальной защиты дыхательных путей.

Концентрация сварочных аэрозолей в воздухе рабочей зоны может быть снижена и с помощью технологических приемов. Установлено, что при ручной дуговой сварке количество аэрозоля, произведенного за единицу времени, пропорционально сварочному току при постоянном токе и напряжении (или длине дуги), скорость формирования сварочного аэрозоля в значительной степени зависит от геометрии шва. Интенсивность дыхательного контакта со сварочными аэрозолями зависит от положения сварщика относительно его рабочего места, например рабочий может выполнять потолочную сварку, напольную, настенную, в угловом положении и т.д.

Несмотря на обширные данные о степени концентрации сварочных аэрозолей в воздухе рабочей зоны, исследований самих сварочных аэрозолей как поражающего фактора не так много. Принято делить составляющие части сварочного аэрозоля на газовую и твердую (ГССА и ТССА), последняя опасна тем, что, проникнув в человеческое тело, она может задерживаться в тканях длительное время. Для того чтобы оценить, какой эффект частицы твердой составляющей сварочного аэрозоля оказывают на организм человека и разработать соответствующие меры снижения риска, необходимо всестороннее изучение ее характеристик.

Настоящая работа посвящена обзору наиболее общедоступных и хорошо зарекомендовавших себя физико-химических методов исследования твердых составляющих сварочных аэрозолей.

¹ The Welding Environment, American Welding Society, Miami, 1973.

Стандартизированных методик отбора образцов твердой составляющей сварочных аэрозолей не существует, информация о способах отбора проб, предложенных разными исследователями, изложена в авторских научных трудах. Так, в работе [3] приведены сведения о многофункциональном устройстве для сбора образцов сварочного аэрозоля с изоляцией сварочного пространства. Практикуется сбор образцов с помощью фильтров и путем осаждения в различных жидкостях. В работе [4] предложен принцип устройства автоматизированной камеры по генерации и сбору аэрозолей, а в работах других исследователей² – принципы лабораторного комплекса, который предполагает участие лабораторных животных в качестве объектов воздействия сгенерированных сварочных аэрозолей.

Все эти способы были опробованы и с их помощью получены уникальные данные, однако их общий недостаток заключается в том, что они исключительно стационарные и требуют массу специального оборудования.

Ряд исследований, ссылаясь на то, что с точки зрения оценки токсичности наиболее важны те частицы, которые попадают в зону дыхания, предлагают использовать систему для отбора проб, расположенную непосредственно на маске сварщика [5].

Нами был разработан собственный метод сбора образцов твердой составляющей сварочных аэрозолей (СА). Метод заключается в осаждении частиц на двухсторонний углеродный скотч, прикрепленный на различные части маски сварщика (рис. 1). Располагать скотч следует

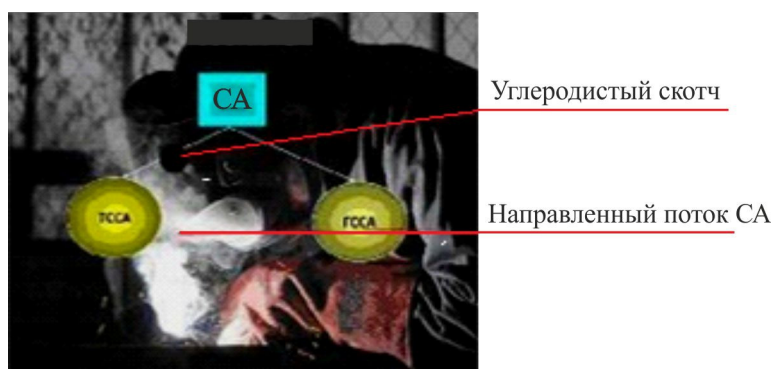


Рис. 1. Принцип сбора образцов ТССА

² Health hazards and biological effects of welding fumes and gases // Proceedings of the International Conference on Health Hazards and Biological Effects of Welding Fumes and Gases, Copenhagen, 1981.

таким образом, чтобы он присутствовал в зоне основного воздушного потока, создаваемого направленной вентиляцией, а после сбора скотч с осажденными частицами следует поместить в герметичный контейнер.

Физико-химическими методами, позволяющими установить основные параметры частиц твердой составляющей сварочных аэрозолей (морфология, размер, химический и морфологический состав), являются: растровая электронная сканирующая микроскопия (РЭМ), фотонная корреляционная спектроскопия (ФКС), рентгеноспектральный микрозондовый анализ (РСМА).

С помощью РЭМ проводится сканирование поверхности углеродного скотча концентрированным пучком электронов. Пучок электронов с первичной энергией около 1–10 кэВ фокусируется системой линз на поверхности исследуемого образца. Метод РЭМ позволяет проводить съемку в режимах химического контраста и в режиме фиксации состояния поверхности образца [6]. Анализ изображений одного участка, полученных при разных режимах, позволит оценить не только морфологию и размер изучаемого объекта, но и сделать выводы о его структуре и степени неоднородности. Применительно к исследованию частиц сварочного аэрозоля данный метод позволил установить, что состав поверхности и ядра многих из них является различным. На рис. 2, 3 представлены примеры изображений частиц сварочных аэрозолей, полученных с применением электронного микроскопа высокого разрешения, модель S3400N фирмы HITACHI (Япония).

Определить фракционный состав частиц сварочного аэрозоля возможно с помощью метода фотонной корреляционной спектроскопии [7]. Данный метод предполагает проведение анализа коллоидного раствора, который освещается узким лучом света монохроматического когерентного источника, т.е. лучом лазера с одной длиной волны λ_0 в вакууме. Свет, рассеянный диспергированными частицами, когерентно детектируется на угле θ по отношению к направлению начального распространения.

Поскольку частицы находятся в постоянном броуновском и/или тепловом движении, будут наблюдаться флуктуации интенсивности светорассеяния $I(t)$ во времени. Анализ флуктуаций интенсивности позволяет получить данные о концентрации частиц разного размера в растворе. Анализ не дает информации о частицах более 20 мкм, так как

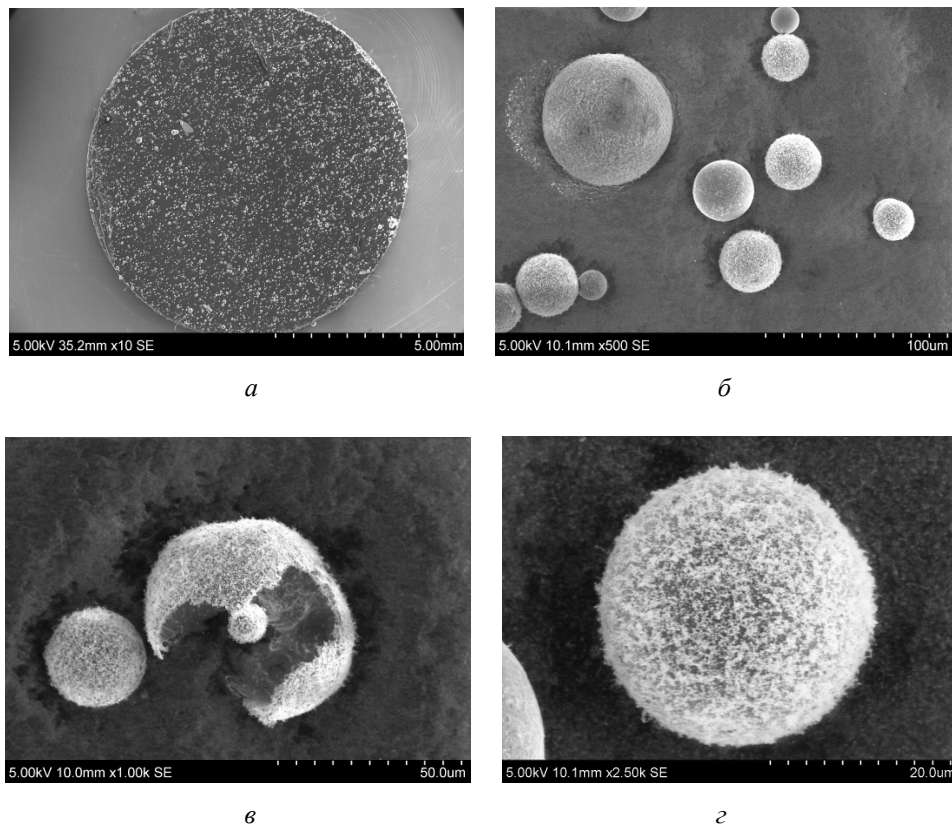


Рис. 2. Твердые частицы сварочного аэрозоля, образованного при ручной дуговой сварке электродом с ильменитовым покрытием:
а – общий вид образца на скотче; *б* – $\times 500$; *в* – $\times 1000$; *г* – $\times 2500$

они не находятся в жидкости во взвешенном состоянии. Результаты анализа фракционного состава твердых составляющих сварочных аэрозолей представлены на рис. 4. Этот пример был получен с помощью установки Zetasizer Nano фирмы Malvern. Раствор с частицами аэрозолей был получен путем осаждения частиц в воду.

Согласно представленным данным основную массу составляют частицы размером 110–1200 нм, причем частицы размером 600 нм составляют приблизительно 96 % от общей массы анализируемых частиц, 4 % от общей массы – частицы размером 6000 нм.

Элементный состав частиц может быть установлен рентгеноспектральным микрозондовым анализом. Принцип действия данного метода следующий: генерируется поток электронов (микрозонд), который фокусируется электромагнитными линзами в узкий пучок. При облу-

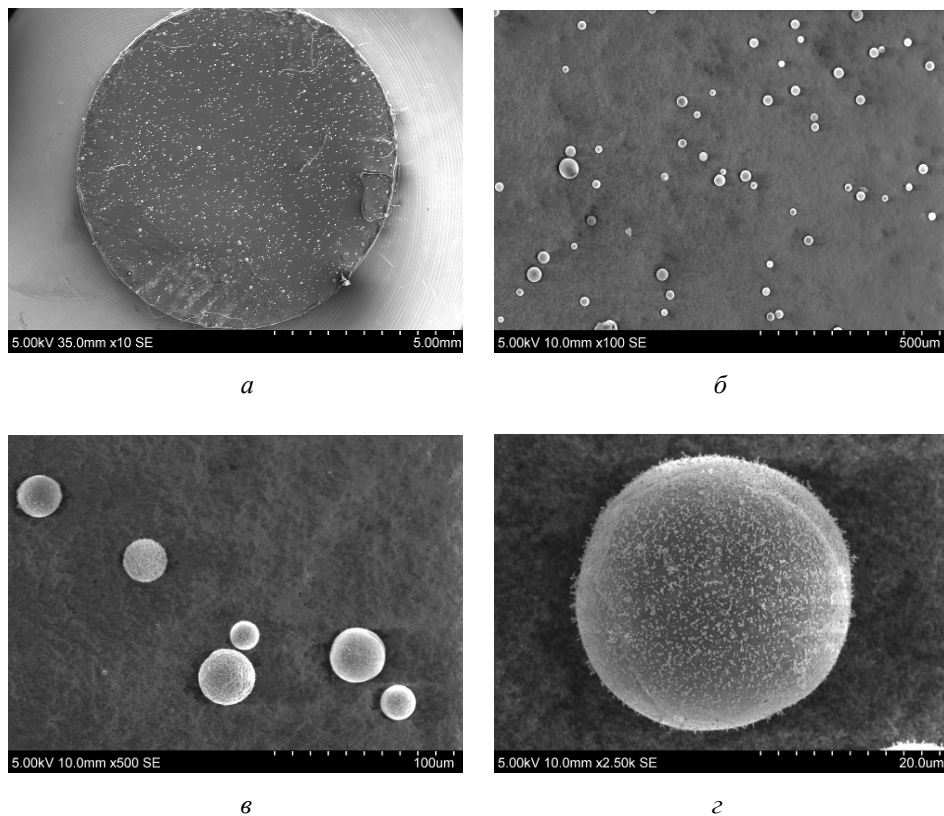


Рис. 3. Изображение твердых частиц сварочного аэрозоля, образованного при ручной дуговой сварке электродом с основным покрытием:
а – общий вид образца на скотче; б – $\times 300$; в – $\times 500$; г – $\times 2500$

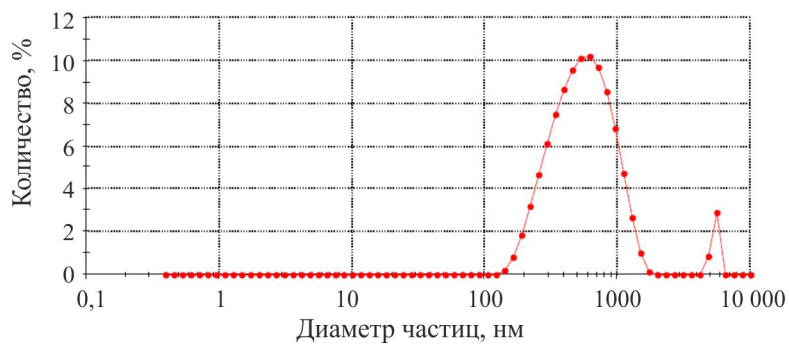
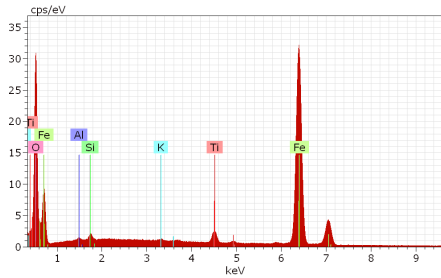


Рис. 4. Фракционный состав твердой составляющей сварочных аэрозолей

чении у атома вещества удаляются электроны из внутренних оболочек. Электроны из внешних оболочек перескакивают на вакантные места, высвобождая избыточную энергию в виде кванта рентгеновского диапазона или передавая ее другому электрону из внешних оболочек (Оже-электрон). По энергии и количеству испущенных квантов судят о количественном и качественном составе анализируемого вещества.

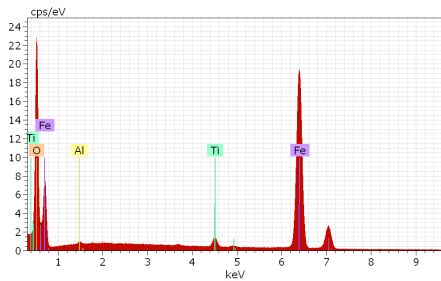
Пример результатов микронзондового анализа, полученных с помощью волнодисперсионной приставки к электронному микроскопу, представлен на рис. 5, эти результаты были использованы для оценки состава частиц сварочных аэрозолей в рамках исследований [8–12].



Spectrum: 1 20

El	AN	Series	Net unkn.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
O	8	K-series	131668	32,54	32,25	62,08
Al	13	K-series	2026	0,23	0,23	0,26
Si	14	K-series	5220	0,39	0,39	0,43
K	19	K-series	2513	0,20	0,20	0,15
Ti	22	K-series	16728	1,81	1,79	1,15
Fe	26	K-series	327778	65,73	65,15	35,93
Total:			100,90	100,00	100,00	

a



Spectrum: 1 21

El	AN	Series	Net unkn.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
O	8	K-series	152315	36,05	35,67	65,76
Al	13	K-series	2126	0,23	0,22	0,24
Ti	22	K-series	13518	1,52	1,50	0,92
Fe	26	K-series	313229	63,28	62,61	33,07
Total:			101,07	100,00	100,00	

б

Рис. 5. Результаты рентгеноспектрального микронзондового анализа твердых частиц сварочного аэрозоля различной формы: *a* – сферических частиц с волокнистой поверхностью; *б* – частиц с гладкой поверхностью

Таким образом, представлен обзор физико-химических методов исследований твердых составляющих сварочных аэрозолей, к которым относятся растровая электронная сканирующая микроскопия,

фотонная корреляционная спектроскопия, рентгеноспектральный микронзондовый анализ, представлены примеры данных, которые могут быть получены с их помощью применительно к исследованию частиц твердой составляющей сварочных аэрозолей, а также методы отбора проб. Сканирующая растровая электронная микроскопия – единственный способ, позволяющий определить морфологию частиц, фотонная корреляционная спектроскопия позволяет быстро и точно определить фракционный состав, рентгеноспектральный микронзондовый анализ в сочетании с растровой электронной микроскопией позволяет получить сведения о элементном составе отдельных частиц и их частей.

Список литературы

1. Гришагин В.М. Сварочные аэрозоли: образование, исследование, локализация, применение: монография / Юргин. техн. ин-т. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. – 213 с.
2. Значение жидкокристаллического состояния биогенных структур в патогенезе вибрационной болезни / В.С. Айзейштадт [и др.] // Гигиена труда и профзаболевания. – 1986. – № 6. – С. 41–44.
3. Zimmer A.T., Baron P., Biswas P. The influence of operating parameters on number-weighted aerosol size distribution generated from a gas metal arc welding process // *Aerosol Science*. – 2002. – Vol. 33. – P. 519–531.
4. Respiratory hazards of welding: Occupational exposure characterization / D.G. Howden [et al.] // *Am. Rev. Respir. Dis.* – 1988. – Vol. 138. – P. 1047–1048.
5. Игнатова А.М., Игнатов М.Н. Оценка морфологии, дисперсности, структуры и химического состава твердой составляющей сварочных аэрозолей посредством современных методов исследований // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2012. – № 3. – С. 133–138.
6. Исследование физико-химических характеристик твердой составляющей сварочных аэрозолей / Д.А. Кузнецов, А.Л. Симонович, С.В. Наумов, А.М. Игнатова // *Аэрозоли Сибири: сб. тез. докл. XIX Раб. группы конф.* / Ин-т оптики атмосферы СО РАН. – Томск, 2012. – С. 78.
7. Характеристика твердой составляющей сварочных аэрозолей различных видов электродных покрытий / Д.А. Кузнецов, А.М. Игнатова, С.В. Наумов, М.Н. Игнатов // *Сварка и диагностика – 2012: сб. докл. науч.-техн. конф.* – Екатеринбург, 2012. – С. 110–114.

8. Игнатова А.М. Современные методы определения фракционного состава сварочных порошковых материалов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 3. – С. 129–133.

9. Игнатова А.М. Механизм образования неметаллических включений в сталях // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 2. – С. 208–211.

10. Игнатова А.М., Кузнецов Д.А., Файнбург Г.З. New viewpoint on certification welding materials from position reduce hazard level for manufacturing employees // Bezpečnost a ochrana zdraví při práci. – 2014. – С. 37–39.

11. Принципы прогнозирования состава твердой составляющей сварочного аэрозоля по виду электродного покрытия / Д.А. Кузнецов, А.С. Смолина, Ю.В. Раков, М.Н. Игнатов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, № 2. – С. 25–34.

12. Оценка аэрозолеобразующих компонентов минерального сырья Пермского края для производства электродных покрытий / Д.А. Кузнецов, А.С. Смолина, Ю.В. Раков, М.Н. Игнатов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, № 2. – С. 25–34.

Получено 10.11.2014

Игнатова Анна Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института безопасности труда, производства и человека, Пермский национальный исследовательский политехнический университет; e-mail: iampstu@gmail.com

Кузнецов Денис Александрович (Пермь, Россия) – магистр кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: bluz-men@gmail.com

Игнатов Михаил Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: iampstu@gmail.ru

Ignatova Anna (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Department of Labor Safety, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: iampstu@gmail.com

Kuznecov Denis (Perm, Russian Federation) – Master, Department “Welding Production and Technology of Structural Materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: bluz-men@gmail.com

Ignatov Mikhail (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, Department “Welding Production and Technology of Structural Materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: iampstu@gmail.ru