

**Д.В. МИНЬКО,**  
**К.Е. БЕЛЯВИН,** д-р техн. наук (БНТУ),  
**О.О. КУЗНЕЧИК** (ГНУ «Институт порошковой металлургии»),  
**В.В. МАКЕЕВ** (УЗ «1-я городская клиническая больница»)

## **ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ**

**Введение.** Анализ литературных источников по формированию покрытий и модифицированию поверхности материалов показывает, что поиск новых методов обработки поверхности остается актуальным. Обеспечение требуемых характеристик поверхностного слоя деталей является насущной задачей машиностроения, решение которой может основываться на использовании электрофизических методов высокоэнергетического воздействия, получивших в последние годы широкое развитие [1–3].

Процессы импульсной электрофизической обработки поверхности материалов сопровождаются формированием плазменных зон воздействия с температурой до 10 000–30 000 К и скоростью нагрева-охлаждения до  $10^8$  К/с [4]. Появление доступных и малогабаритных источников импульсной энергии (высоковольтных электрических, импульсно-плазменных и импульсно-лазерных), способных создавать направленные высококонцентрированные энергетические потоки с малой длительностью пульсации, открывает новые возможности разработки и создания новых устройств для импульсной электрофизической обработки протяженных поверхностей материалов.

В то же время цель использования той или иной технологии должна сводиться не просто к получению изделий с заданным комплексом эксплуатационных характеристик, а учитывать требования снижения материальных, энергетических и трудовых затрат. Применяемые в настоящее время технологии получения покрытий и модифицирования поверхностных свойств материалов, включающие печную, электродуговую, газопламенную и плазменную обработку, имеют низкую производительность и низкую энергоэффек-

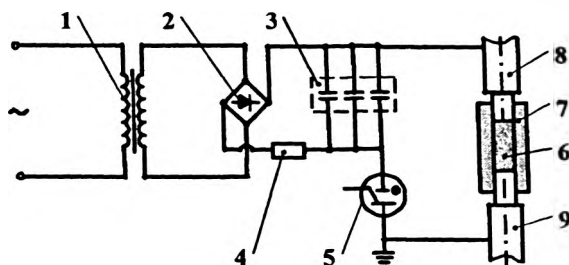
тивность. Поэтому внедрение новых электрофизических технологий, разработанных на стыке современных достижений физики высоких энергий и материаловедения, является одним из приоритетных направлений научных исследований [1].

Избирательность применения, высокая энергоэффективность и производительность, экологичность, высокая чистота и однородность структуры получаемых материалов являются несомненными преимуществами импульсных электрофизических технологий. Однако их широкому внедрению в производство препятствует отсутствие серийно выпускаемого оборудования, а также подготовленных специалистов в этой области.

Вместе с тем опыт разработки и использования на практике технологий электроимпульсного и электроразрядного спекания, селективного лазерного спекания и импульсно-плазменной обработки позволяет надеяться на их дальнейшее широкое внедрение в производство.

**Электроимпульсное спекание.** Одним из физических методов, активирующих процесс получения покрытий, является обработка электрическим током, основанная на комбинированном действии электрической энергии и механического давления и позволяющая осуществлять одновременное уплотнение и наплавку порошковых слоев в отличие от традиционных технологических процессов порошковой металлургии с раздельным выполнением этих операций.

Процесс электроимпульсного спекания (ЭИС) [5] основан на пропускании через находящийся в диэлектрической матрице 7 порошок 6 (рисунок 1), содержащий электропроводящие компоненты, мощного ( $10^3$ – $10^6$  кА/м<sup>2</sup>) кратковременного ( $10^{-5}$ – $10^{-2}$  с) импульса тока, создаваемого емкостным генератором 3. Ток подводится через электрод-пуансон 8 и заготовку 9, при этом происходит локальный разогрев и соединение частиц порошка в зоне их контакта с поверхностью заготовки и друг с другом. Достоинство метода заключается в скорости получения покрытия с однородной плотностью, позволяющей работать без защитной атмосферы даже с активными металлами. Этот метод представляется идеальным для получения пористых покрытий из порошков тугоплавких материалов, таких как вольфрам, ниобий, тантал, титан.



1 – повышающий трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – емкостный накопитель энергии; 4 – ограничивающий резистор; 5 – интронный разрядник; 6 – порошок; 7 – диэлектрическая матрица; 8 – электрод-пуансон; 9 – заготовка

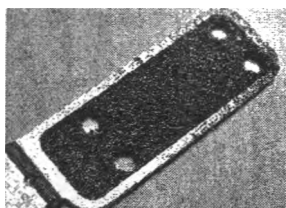
Рисунок 1 – Функциональная схема установки электроимпульсного спекания (ЭИС)

Проведенные экспериментальные исследования зависимости свойств пористых покрытий из сферических частиц титана (пористость, размер пор, прочность) от технологических параметров процесса ЭИС позволили определить их оптимальные значения (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики пористых покрытий из сферических частиц порошка титана

Материал	Размер частиц, мм	Пористость, %	Средний размер пор, мкм	Временное сопротивление при поперечном изгибе $\sigma_{\text{изб}}$ МПа
Титановый сплав ВТ1-0 ГОСТ 19807-91	0,315–0,4	35–40	120–130	54–60
	0,4–0,63	38–42	130–140	42–50

Показано, что между частицами порошка при ЭИС происходит образование достаточно прочного контакта, составляющего 0,1–0,2 диаметра частицы порошка (рисунок 2), причем прочностные свойства покрытия могут быть повышены путем дополнительной термовакуумной обработки (таблица 2).



а



б

а – внешний вид; б – хрупкий излом

Рисунок 2 – Пористое покрытие из сферических частиц порошка титана

Таблица 2 – Прочность пористого покрытия из сферических частиц порошка титана при ЭИС и при различных режимах последующей термовакуумной обработки

Материал	Размер частиц, мм	Предел прочности на отрыв $\sigma_{отр}$ , МПа			Предел прочности на срез $\sigma_{ср}$ , МПа		
		После ЭИС	$T_{стек}$ 1100 °С	$T_{стек}$ 1350 °С	После ЭИС	$T_{стек}$ 1100 °С	$T_{стек}$ 1350 °С
Титановый сплав ВТ1-0 ГОСТ 19807-91	0,315–0,40	6,41–7,13	14,67–15,04	37,43–37,71	21,52–21,71	37,88–38,37	63,09–63,43
	0,40–0,63	5,35–5,71	6,59–6,71	12,75–13,06	17,41–17,76	26,31–26,87	42,18–42,56

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса ЭИС позволили разработать технологию получения пористых покрытий из порошков тантала, ниобия, вольфрама и титана, сформулировать требования к оборудованию, определить необходимые диапазоны геометрических, механических, электрических и временных параметров. В соответствии с этим разработаны методики и аппаратура для регулирования и измерения энергосиловых параметров процесса ЭИС.

На основании проведенных исследований разработан и автоматизирован технологический процесс получения ниобиевых и танталовых объемно-пористых анодов оксидно-полупроводниковых конденсаторов (рисунок 3). Для осуществления технологического процесса были сконструированы и изготовлены две автоматизированные установки ЭИС (рисунок 4) производительностью до 10 тыс. шт. изделий в смену. Внедрение технологии и оборудования

на ПО «Эликон» (г. Одесса) и ПО «Оксид» (г. Новосибирск) позволило по сравнению с применяемой ранее технологией повысить удельную поверхность и электроемкость объемно-пористых анодов на 30–80 %, уменьшить расход материалов на 60 %, повысить производительность в 3 раза.

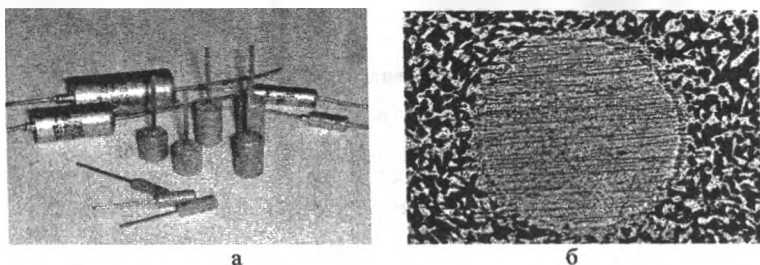


Рисунок 3 – Ниобиевые объемно-пористые аноды конденсаторов (а) и структура их поперечного сечения (б,  $\times 500$ )

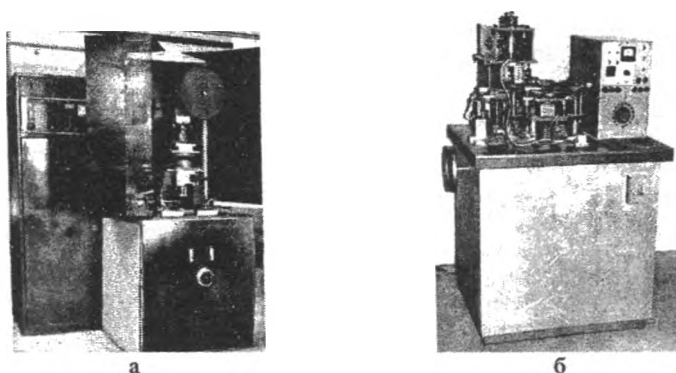


Рисунок 4 – Автоматизированные установки для ЭИС ниобиевых (а) и танталовых (б) объемно-пористых анодов оксидно-полупроводниковых конденсаторов

Разработанная технология ЭИС пористых композиционных покрытий на поверхности вольфрамовых катодов газоразрядных ламп обеспечивает равномерность распределения эмиссионного материала (порошка  $\text{Ba}_2\text{CaWO}_6$ ) в поровом пространстве металлического

каркаса из порошка вольфрама и открытую пористость на поверхности покрытия (рисунок 5).

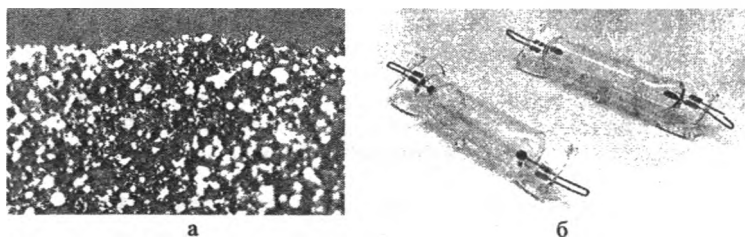


Рисунок 5 – Структура композиционного вольфрамового катода (а,  $\times 500$ ) и элементы конструкции газоразрядных ламп с катодами, полученными методом ЭИС (б)

Внедрение технологии на опытном заводе ВНИИ источников света им. А.Н. Лодыгина (г. Саранск) по сравнению с традиционной снизило потребление вольфрама на 20 %, повысило производительность изготовления катодов без снижения эксплуатационных характеристик газоразрядных ламп.

Особый интерес представляет разработка технологии ЭИС пористых покрытий из сферических частиц титана для нужд медицины и биологии. Как показывают проведенные исследования, такие покрытия обладают регулярной структурой, открытой пористостью (30–50 %), высокой проницаемостью и коррозионной стойкостью, хорошей биологической совместимостью с тканями человеческого организма, легкостью и прочностью. Наиболее широкое применение в клинической практике получили работы в области челюстно-лицевой хирургии и кардиологии. Разработанные совместно с учреждениями Министерства здравоохранения Республики Беларусь конструкции дентальных имплантатов и минипластины для остеосинтеза костей лицевого скелета с пористыми покрытиями из сферических частиц порошка титанового сплава марки ВТ1-0 (рисунок 6) успешно прошли приемочные медицинские испытания и получили регистрационные удостоверения, дающие право их серийного выпуска. Внедрение разработанных изделий в медицинскую практику позволило сократить закупку импортных аналогов и сроки послеоперационной реабилитации больных.

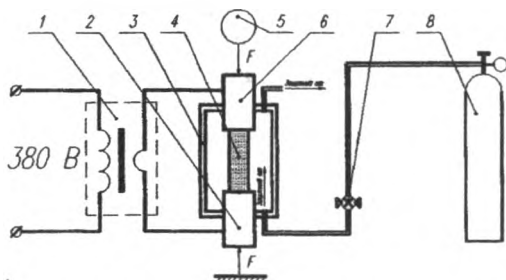


Рисунок 6 – Конструкции дентальных имплантатов в форме корня зуба (а) и цилиндрических (б), минипластины для остеосинтеза костей лицевого скелета (в)

Внедрение технологии ЭИС пористых контактных головок в ОАО СКБ медицинской электротехники (г. Каменец-Подольский) позволило разработать новые конструкции эндокардиальных электродов, в том числе уменьшенных габаритов для применения в детской кардиологии.

**Электроразрядное спекание.** Электроразрядное спекание (ЭРС) заключается в воздействии на находящийся в замкнутом объеме спрессованный при давлении 0,1–100 МПа порошок токами плотностью  $10^3$ – $10^5$  кА/м<sup>2</sup>, действующими на протяжении от нескольких секунд до нескольких минут [6] (рисунок 7). При этом возможно пропускание электрического тока не только через порошок, но и частично через пресс-инструмент (чаще графитовый).

Метод ЭРС обеспечивает высокую скорость протекания металлургических высокотемпературных процессов на границе раздела частиц порошка, что позволяет получать покрытия с повышенным комплексом эксплуатационных характеристик.



1 – трансформатор; 2 – заготовка; 3 – пресс-форма; 4 – порошок; 5 – устройство нагружения; 6 – электрод верхний; 7 – редуктор; 8 – баллон с защитным газом

Рисунок 7 – Функциональная схема установки ЭРС

Метод ЭРС, как правило, не используют для получения пористых материалов и покрытий из-за сложности обеспечения равномерного объемного распределения тока, связанного с длительным нагревом порошка. Тем не менее, нами были получены пористые покрытия толщиной до 1 мм из сферических частиц порошка титана с размером 0,2–0,315 мм (рисунок 8).

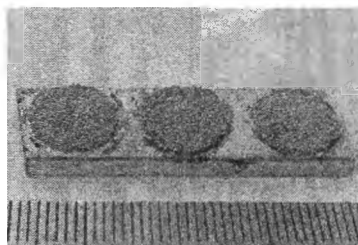
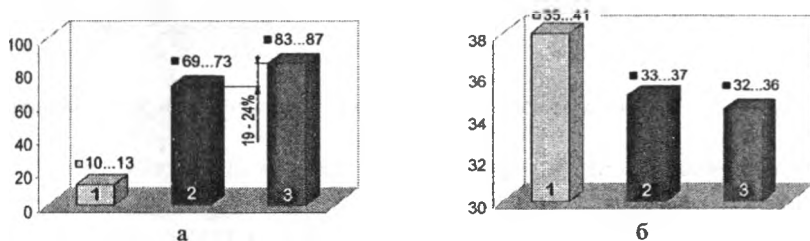


Рисунок 8 – Фрагменты пористого покрытия из сферических частиц порошка титана

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать технологию упрочняющей электроразрядной обработки (ЭРО) пористых покрытий, полученных методом ЭИС из сферических частиц порошка титана [7]. Показано, что дополнительная ЭРО пористых заготовок позволяет увеличить размеры и качество контактных шеек между частицами порошка и, в конечном итоге, в 3–5 раз повысить прочность материала при уменьшении пористости на 3–5 % (рисунок 9).



1 – ЭИС; 2 – ЭИС + термовакuumная обработка; 3 – ЭИС + ЭРО

Рисунок 9 – Прочность на срез  $\sigma_{cp}$ , МПа (а) и пористость  $P$ , % (б) пористых покрытий из сферических частиц порошка титана



Опытные партии фильтрующих элементов для очистки пара и для стерилизации воздуха, полученные по технологии упрочняющей ЭРО, переданы на ОАО «Молодечненский Гормолзавод» и ОАО «Рогачевский МКК».

**Селективное лазерное спекание.** Селективное лазерное спекание (СЛС) относится к инновационным технологиям порошковой металлургии, позволяющим получать пористые покрытия со сложной геометрией поверхности [8, 9]. Технология СЛС основана на использовании энергии лазерного излучения для последовательного послойного спекания частиц порошка посредством оплавления их поверхности, что приводит к образованию металлических контактов в присутствии жидкой фазы.

Разработанная технология СЛС порошков позволяет получать покрытия в среде защитного газа сканированием лазерного луча по обрабатываемой поверхности порошкового слоя, укладка которого осуществляется вибродозатором оригинальной конструкции. Преимуществом дозатора перед имеющимися аналогами является возможность получения пористых покрытий на поверхности монолитной заготовки со сложной геометрией поверхности (рисунок 10).

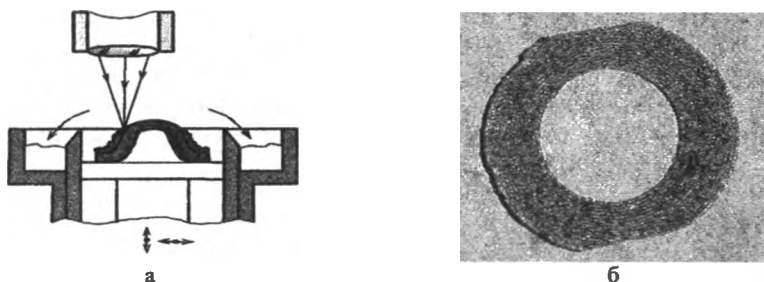


Рисунок 10 – Схема вибродозатора (а) и фрагмент покрытия из порошка титана (б)

Установлено, что на процесс СЛС порошков основное воздействие оказывают параметры лазерного излучения, которые определяются энергией и длительностью импульсов, а также их частотой и количеством. С целью изучения кинетики роста межчастичных контактов при СЛС был проведен металлографический анализ образцов пористого покрытия.

На фотографии полученного СЛС слоя порошка титана толщиной в одну частицу (рисунок 11) видно, что частицы порошка сохранили свою сферическую форму и соединены друг с другом контактными шейками, образовав пористую структуру, что подтверждает идею поверхностного нагрева и оплавления лучом лазера.

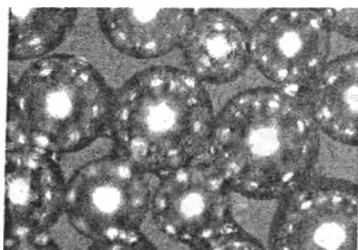


Рисунок 11 – Структура монослоя частиц порошка после СЛС,  $\times 10$

Механизм такого образования контактов между частицами подтверждается исследованиями микроструктуры образцов (рисунок 12). В результате оплавления лучом лазера и последующей кристаллизации произошло измельчение зеренной структуры титана на поверхности частиц порошка, что свидетельствует о том, что образование контактной шейки при лазерном воздействии происходит за счет поверхностного оплавления частиц порошка с сохранением твердой фазы в центре.

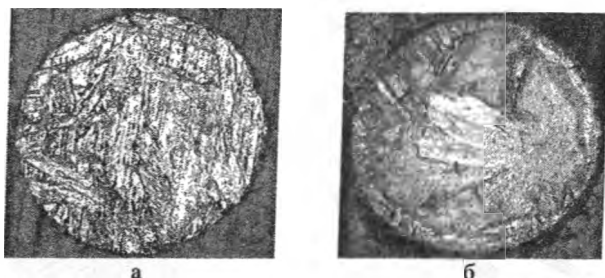


Рисунок 12 – Микроструктура частицы порошка титана до (а) и после СЛС (б),  $\times 200$

Установлено, что при получении пористого покрытия требуется увеличение мощности лазерного излучения, что объясняется необходимостью оплавления поверхности подложки для образования контактных шеек между ней и частицами порошка. При этом происходит сильный разогрев поверхности заготовки, приводящий к оплавлению частиц порошка и изменению их формы, которое устранивается при СЛС последующих слоев при снижении мощности лазерного излучения (рисунок 13).

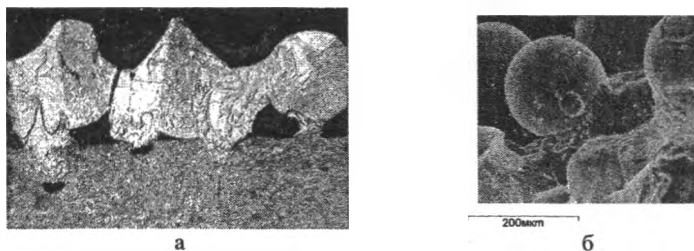


Рисунок 13 – Микроструктура первого слоя (а,  $\times 50$ ) и топограмма второго слоя (б) частиц порошка пористого покрытия при СЛС

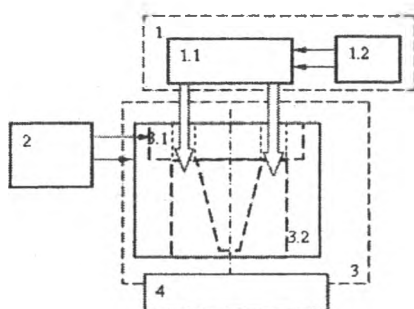
Разработанная технология СЛС внедрена в производство индивидуальных имплантатов для эндопротезирования нижней челюсти и имплантатов для межтелового спондилодеза с пористыми покрытиями из порошков титанового сплава марки ВТ1-0 (рисунок 14), которые в 2010 г. успешно прошли приемочные медицинские испытания и получили регистрационное удостоверение, дающее право серийного выпуска.



Рисунок 14 – Индивидуальные имплантаты для эндопротезирования нижней челюсти (а) и имплантат для межтелового спондилодеза (б)

Внедрение разработанных изделий в медицинскую практику позволило сократить закупку импортных аналогов и сроки послеоперационной реабилитации больных.

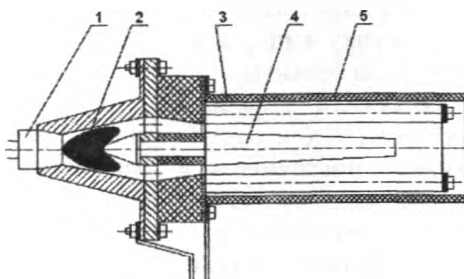
**Импульсно-плазменная обработка.** Технология импульсно-плазменной обработки (ИПО), разработанная для упрочнения металлообрабатывающего инструмента, а также деталей машин, является перспективным направлением в области модифицирования свойств поверхности материалов и покрытий. Принцип ИПО заключается в ускорении потока стационарной плазмы с помощью импульсных высоковольтных ( $10^3$ – $10^4$  В) разрядов с регулируемой частотой следования (0,1–10 Гц) до сверхзвуковых скоростей (рисунок 15). В формирующихся таким образом импульсных плазменных пучках плотность тока достигает значений порядка  $10^3$ – $10^4$  кА/м<sup>2</sup>, а локальная температура плазмы может достигать значений  $\sim 10^4$  К [10].



- 1 – источник стационарной плазмы; 2 – высоковольтный генератор;  
3 – ускорительная камера; 4 – обрабатываемая поверхность

Рисунок 15 – Функциональная схема установки ИПО

Генерируемые с помощью ускорительной камеры (рисунок 16) плазменные пучки могут быть использованы для поверхностной обработки материалов и покрытий с различной геометрией поверхности с целью управления структурой, фазовым составом, физико-механическими и эксплуатационными свойствами (рисунок 17).



1 – плазмотрон источника стационарной плазмы; 2– плазменный факел;  
3 – экран; 4 – катод; 5 – анод

Рисунок 16 – Ускорительная камера установки ИПО

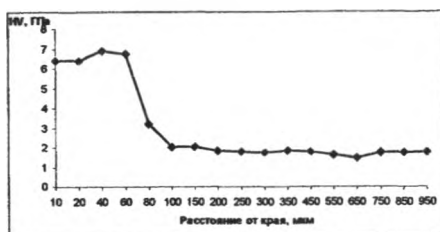
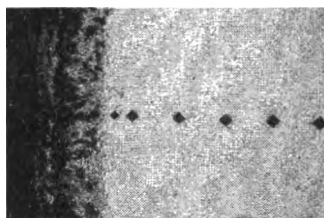


Рисунок 17 – Изменение микротвердости стали 40X13 в направлении от поверхности к центру поперечного сечения после ИПО

## Выводы

Проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, позволивших разработать новые энергоэффективные технологические процессы электроимпульсного, электроразрядного, селективного лазерного получения пористых покрытий из порошков ниобия, тантала, вольфрама, титана и импульсно-плазменной обработки углеродистых и инструментальных сталей. Сконструировано и изготовлено пять технологических установок, проведена доработка и модернизация трех лабораторных установок. Результаты научных исследований представлены в более 200 публикациях, в том числе 4-х монографиях. Новизна технических решений подтверждена более 50 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения. Разработанные импульсные электрофизические тех-

нологии, изделия, установки и устройства внедрены в производство на предприятиях и в организациях Республики Беларусь и СНГ.

### Литература

1. **Перечень** приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы (в ред. постановления Совета Министров Республики Беларусь от 12.08.2010 № 1196).

2. **Tyurin, Yu N.** Plasma-Detonation Technology for Modification of the Surface Layer of Metal Parts / Yu N. Tyurin, O.V. Kolisnichenko // *The Open Surface Science Journal*. – 2009. – № 1. – P. 13–19.

3. **Kumara, Sanjeev.** Surface modification by electrical discharge machining / Sanjeev Kumara [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009). – P. 3675–3687.

4. **Hedvig, R.** Toward quantitative deuterium analysis with laser-induced breakdown spectroscopy using atmospheric-pressure helium gas / R. Hedvig [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2010. – Vol. 107. – № 2, – pp. 023301 1–5.

5. **Теория и практика** электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов / К.Е. Белявин [и др.]. – Минск: ООО «Ремико», 1997. – 180 с.

6. **Райченко, А.И.** Основы процесса спекания порошков пропусканьем электрического тока / А.И. Райченко. – М.: Metallurgia, 1987. – 128 с.

7. **Сравнительные исследования** микроструктуры и прочности пористых материалов из порошка титана, полученных спеканием в вакууме и методом электроконтактного нагрева в защитной атмосфере / К.Е. Белявин [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 4. – С. 122–127.

8. **Hanninen, J.** Direct metal laser sintering / J. Hanninen // *Advance materials & processes*. – 2002, May. – P. 33–35.

9. **New Technology** of Selective Laser Sintering / К.Е. Белявин [et al.] // *EURO PM2005 Congress and Exhibition. Proceedings. 2–5 October 2005, Prague, Czech Republic*. – Prague, 2005. – V. 2. – P. 171–176.

10. **Установка** для обработки материалов и покрытий воздушной импульсной плазмой / Ю.А. Чивель [и др.] // *Техника машиностроения*. – 2010. – № 3. – С. 50–55.