

18. Патент РБ №3207 МКИ В22 F1/100,9/
6. Способ нанесения диффузионных покрытий на металлические порошки, преимущественно для наплавки/Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М., Штемпель О.П.

19. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Штемпель О.П. Ресурсо-энергосберегающая технология получения наплавочных диффузионно-легированных порошковых сплавов// Сварка и родственные технологии. Вып. №4, 2001. — С. 57–60.

20. Константинов В.М., Штемпель О.П. Изучение особенностей диффузионного легирования металлических порошков в подвижных порошковых смесях/ Сборник научных трудов «Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения». — Мн.: «Технопринт» Полоцк: ПГУ, 2001. — С. 88–93.

21. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Штемпель О.П. Синтез наплавочных порошков диффузионным легированием // Ремонт, восстановление, модернизация, 2002. — №5. — С. 15–18.

22. Штемпель О.П., Соколова Н.В. (рук. Константинов В.М.) Исследование интенсификации диффузионного легирования микрообъектов// Сборник научных трудов «Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения». — Мн.: Технопринт, Полоцк: ПГУ, 2001. — С. 155–158.

23. Боровицкая Т.В. (рук. Константинов В.М.), Изучение особенностей процесса обезуглероживания чугуновой стружки во вращающемся контейнере// Сборник научных трудов «Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий ма-

шиностроения». — Мн.: Технопринт, Полоцк: ПГУ, 2001. — С. 152–155.

24. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Жабуренок С.Н. Исследование экономно-легированных наплавленных слоев самозатачивающихся рабочих органов почвообрабатывающих машин/ Республиканский межведомственный сборник научных трудов «Сварка и родственные технологии». — Мн., 2000. — Вып. 3. — С. 102–103.

25. Константинов В.М., Сивый С.Б., Фруцкий В.А. Разработка экономно-легированных материалов для восстановления подшипников скольжения //Сборник научных трудов «Современные материалы и технологии восстановления деталей машин». — Новополоцк: ПГУ 1999. — с. 28–30.

26. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Фруцкий В.А. Газотермические покрытия из диффузионно-легированной чугуновой стружки как альтернатива антифрикционным бронзам/ Сборник научных трудов «Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения». — Мн.: Технопринт, ПГУ, 2001. — С. 105–110.

27. Константинов В.М., Сороговец В.И., Боровицкая Т.В. Повышение износостойкости чугуновых деталей дробеметных установок поверхностным плазменным упрочнением//Сборник «Металлургия», 2002. — С. 28–32.

28. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Войтехович В.А. Разработка диффузионно-легированного сплава для восстановления наплавкой инструмента горячештамповой оснастки// Ремонт, восстановление, модернизация, 2002, №8. — С. 29–33.

ОСОБЕННОСТИ ФАЗО- И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Специфические условия эксплуатации современной техники требуют создания защитных покрытий, обеспечивающих высокую стойкость к изнашиванию, повышенным температурам, окислению, механическим нагрузкам. Химический, фазовый состав, структура и физико-механические характеристики газотермических покрытий определяются состоянием частиц исходных порошков и физико-химическими превращениями, протекающими при формировании, термической обработке и эксплуатации напыленных слоев. Эффективность практического использования композиционных порошков и покрытий, полученных в плазменном потоке, обусловлена степенью неравновесности этих материалов.

В настоящей работе описан ряд самоорганизующихся процессов, приводящих к формированию необычных градиентно-слоевых структур с уникальным комплексом свойств.

Объектами исследований служили композиционные порошки на основе карбидов, боридов, оксидов алюминия, цир-

кония, титана, хрома нитрида титана и плазменные покрытия, сформированные из самофлюсующихся сплавов, упрочненных

Ч.А. Руденская,

д-р техн. наук,
главный научный
сотрудник
кафедры
технологии
конструкционных
материалов.

Полоцкий
государственный
университет

вышеперечисленными тугоплавкими соединениями. Возможности выбора тугоплавких соединений по мере роста температуры снижаются вследствие убывания их стойкости против окисления. В связи с этим возникает необходимость защиты тугоплавких частиц от взаимодействия их с плазменным потоком и матричным сплавом при последующем оплавлении напыленных слоев, например, путем плакирования. Важным моментом остается то, что при подготовке композиционного порошка для напыления необходимо иметь исчерпывающую информацию об индивидуальных особенностях его поведения на всех стадиях формирования покрытия.

Синтез, сфероидизацию и плакирование порошков проводили в условиях низкотемпературной плазмы на установке УПСР-1 конструкции ИМет им. А.А.Байкова. Покрытия после напыления подвергали оплавлению в печи и газокислородным пламенем.

В ходе исследований набран статистический материал по структурам различных составов и типов покрытий, на основании которого можно утверждать, что обнаружен ряд неизвестных ранее самоорганизующихся процессов модифициро-

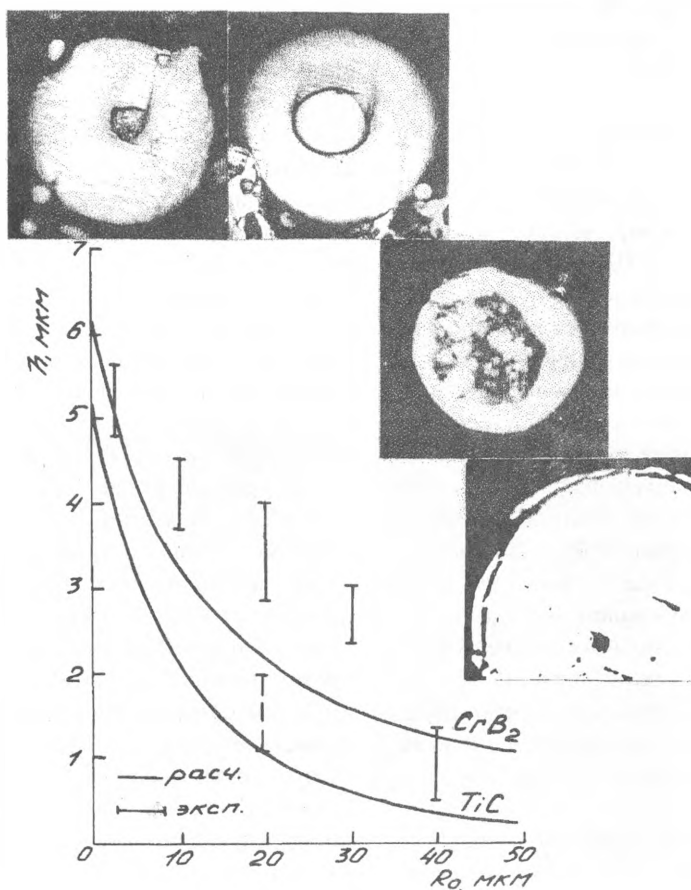
вания состава и структуры газотермических покрытий, которые обусловлены протеканием физико-химических превращений в микро- и макрообъемах при формировании напыленных слоев. Основные из них описаны ниже.

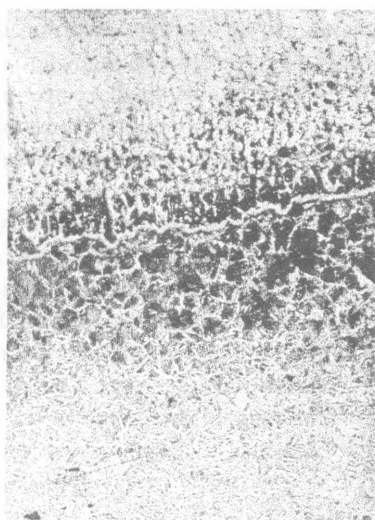
1. Формирование композиционной и многослойной структуры тугоплавких ядер и оболочек повышенной микротвердости при плазменном синтезе порошков. Ядро композиционной частицы может состоять из нескольких плакированных частиц одного или разных материалов, причем каждая частица имеет сферическую или округлую форму и плотную (практически беспористую) структуру [1–8]. Подобные по составу и структуре частицы невозможно получить ни одним из известных методов плакирования [9]. В условиях плазменного потока возможно не только проводить сфероидизацию, плакирование и конгломерацию тугоплавких порошков, но и формировать на их поверхности многослойные оболочки различного состава: металл, интерметаллид, простой или сложный карбид (борид, оксинитрид и др.) [1–8, 10–12].

Состояние границы раздела ядро — оболочка является одним из основных показателей плакирования. Отсутствие химических взаимодействий в этой зоне приводит к сворачиванию плакирующего слоя в процессе напыления порошков, полученных низкотемпературными методами (химическим, электролитическим, карбонильным) [9]. Равномерное распределение плакирующих слоев и их высокая адгезия на композиционных гранулах в плазменном потоке предотвращают сворачивание оболочек из металлов (сплавов) при последующем газотермическом напылении порошков. Возможности выбора толщины оболочки, дисперсности и состава тугоплавких ядер (рис. 1), а также механизма их взаимодействия позволяют управлять физико-механическими характеристиками покрытий.

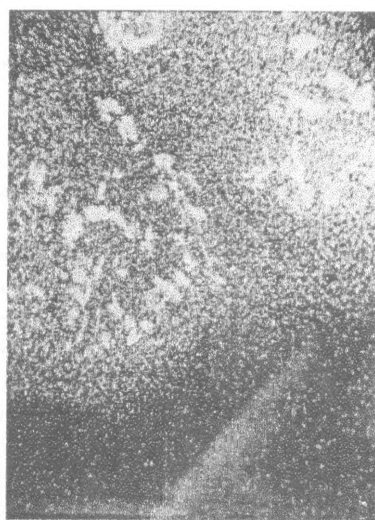
Особый интерес представляет процесс, названный нами «самоплакирование» [10]. Сущность его состоит в самопроизвольном формировании оксинитридных фаз различного состава на частицах нитрида титана при взаимодействии их с газовоздушным плазменным потоком [10–12] как при нанесении покрытий, так и в процессе синтеза многофазных частиц. Количественный микроанализ показал, что оболочка на частицах TiN состоит из 4...7 слоев и имеет следу-

Рис. 1. Экспериментальные и расчетные значения толщины оболочки никеля в зависимости от радиуса тугоплавких частиц





а)



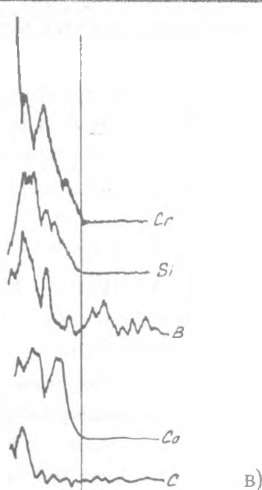
б)

Рис. 2. Переходная зона между покрытием и основным металлом (ст. 3):

а — микроструктура переходной зоны ($\times 60$);

б — распределение карбидных зерен матричного (NiCrBSi) сплава вблизи границы раздела покрытие-сталь;

в — распределение элементов в покрытии и в основном металле.



в)

ющий состав: $\text{Ti}(\text{N}_{1-x}\text{O}_x)_{1.0}$ ($x = 0.10 \div 0.15$); $\text{Ti}(\text{N}_{1-x}\text{O}_x)_{0.85}$ ($x = 0.10 \div 0.20$); $\text{TiO}_{0.75-x}\text{N}_x$ ($x = 0.25 \div 0.30$); $\text{TiO}_{1.10-x}\text{N}_x$ ($x = 0.05 \div 0.10$); с микротвердостью соответственно 1780÷1800, 2300÷3200, 2100÷2800, 1250÷1520. В целом многослойность оболочки способствует повышению микротвердости до 3500 кг/мм² вследствие увеличения количества межфазных границ. Самоплакирование позволило существенно повысить износо- и трещиностойкость композиционных покрытий. Если учесть, что проблема плакирования нитрида титана остается открытой [13], поскольку краевой угол смачивания нитрида титана кобальтом и никелем значительно выше нулевого, а при плакировании нитрида титана никель-молибденовым сплавом не удастся избавиться от дефектов покрытий, то описанные выше результаты открывают перспективу создания новых композиционных материалов (порошков и покрытий) на основе нитрида титана.

2. **Взаимодействие** покрытий с основным металлом в процессе оплавления.

На границе раздела покрытие — основной металл формируется переходная зона, состоящая из 2–6 слоев в зависимости от способа и режима оплавления, состава и дисперсности упрочняющей фазы [2, 14–16]. Основными составляющими переходной зоны являются следующие микрослои: прослойка — твердого раствора на основе Ni (рис. 2, а); перлитная зона; слой, насыщенный твердыми зернами упрочняющей фазы и вторичными карбидными зернами матричного сплава (формируется и в случае использования в качестве упрочняющей добавки плакированных частиц) (рис. 2, б); зоны диффузии железа в покрытие и элементов подложки в стали (рис. 2, в). Исследование процессов взаимной диффузии элементов покрытия и подложки свидетельствует о максимальной по величине зоне диффузии бора (до 36 мкм) в основном металле.

Вывод этой части работы сводится к следующему: граница раздела покрытие — сталь после оплавления имеет многослойную структуру, существует возможность управления процессами фазо- и структурообразования каждого микрослоя с одновременным изменением структуры покрытия в целом.

3. **Диффузионные процессы** в матричном сплаве, приводящие к послойной химической неоднородности покрытия [15]. В качестве матричного сплава использовали самофлюсующийся сплав системы Ni-Cr-B-Si (Co-Cr-B-Si). При термообработке (оплавлении) покрытий отмечено повышение концентрации таких элементов матричного сплава, как Cr, Ni, Co, Si, в направлении от границы раздела к поверхности напыленного слоя. Аналогичная закономерность установлена для элементов неплакированных тугоплавких добавок, например, титаносодержащих (TiB_3 , TiCrB_2 , TiCN); концентрация титана возрастает от границы раздела к поверхности покрытия от 2 до 13%. Известно [17], что кремний повышает активность хрома в твердом растворе, при наличии углерода и бора это должно способствовать образованию карбидов и боридов. Действительно, в приповерхностной зоне покрытия отмечено повышенное содержание боридов хрома и титана, чем и обусловлен рост микротвердости от границы раздела (183÷857) к поверхности слоя (536÷1167 кг/мм²). В целом матричный сплав характеризуется градиентной и многослойной структурой: свет-

лотравящаяся эвтектика переходит в темнотравящуюся эвтектику, и каждая из них имеет переменный по высоте химический состав с определенной закономерностью распределения зерен упрочняющей фазы по дисперсности (рис.3).

Рис. 3. Микроструктура матричного (NiCrBSi) сплава (×400): 1 — светлотравящаяся эвтектика; 2 — темнотравящаяся эвтектика

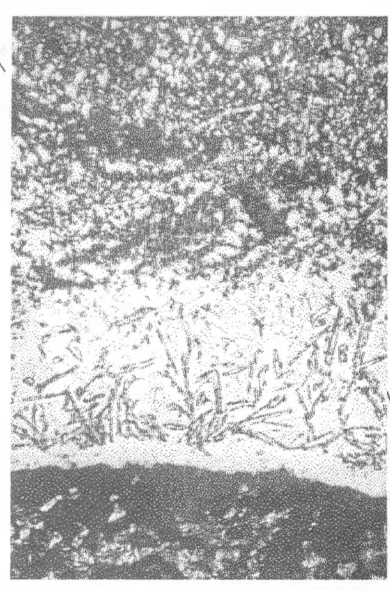
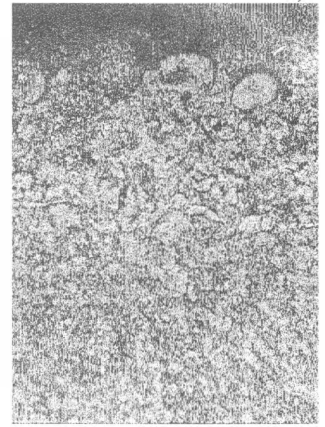
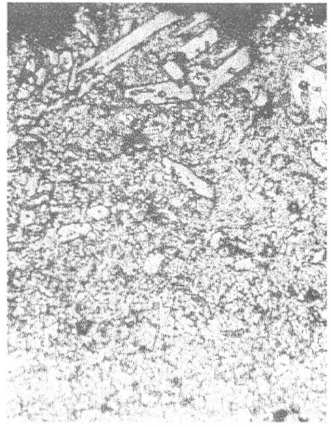
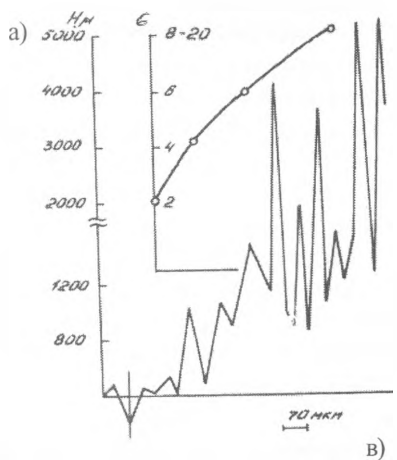


Рис. 4. Изменение микротвердости и износостойкости покрытий в направлении от границы раздела к поверхности напыленного слоя (а) при всплывании исходных (б) и сфероидизированных (в) тугоплавких частиц (×400).



4. **Взаимодействие** частиц упрочняющей фазы с матричным сплавом. Введение частиц упрочняющей добавки в самофлюсующиеся сплавы получило широкое распространение, поскольку при этом существенно улучшаются физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий. И тем не менее поведение частиц упрочняющих добавок в процессе оплавления практически не изучено. Микроструктура оплавленных покрытий зависит не только от дисперсности и состава упрочняющей фазы, но и от характера распределения частиц в напыленном слое. В работе [15] показано, что оплавление вызывает миграцию частиц упрочняющих добавок по высоте покрытия. Характер распределения тугоплавких частиц по высоте напыленного слоя определяется плотностью и размером частиц. Из ряда исследованных материалов, расположенных по возрастанию скорости их всплывания (ω) в матричном сплаве, рассчитанной по уравнению Стокса (частицы WC, Cr₃C₂, CrB₂, ZrB₂ распределены равномерно):

$TiCN_{cf} \rightarrow TiC \rightarrow TiCN_{исх} \rightarrow TiB_{2исх} \rightarrow (TiCr)_B \rightarrow TiB_{2сф}$
 0,587 0,629 0,730 0,734 0,800 0,849
 (цифрами показана доля тугоплавких частиц в поверхностном слое покрытия ($\pm 0,049$)), критической плотностью в пределах исследованного ряда соединений характеризуется карбид титана. Относительно карбида титана частицы других материалов распределяются равномерно по высоте слоя покрытия или всплывают к его поверхности, при этом наблюдается послойное изменение твердости и износостойкости покрытий (рис. 4). Равномерно в напыленном слое распределяются и плакированные тугоплавкие частицы. Таким образом, существует возможность формирования поверхностной части покрытия с повышенными эксплуатационными характеристиками — «рабочего слоя», размером, составом и структурой которого позволяют управлять установленные закономерности: диаграммы относительной износостойкости — твердости, зависимости относительной износостойкости от состава, размера, способа синтеза тугоплавких составляющих, пористости покрытий, условий их оплавления [11–12, 14–15].

5. **Распределение** шлаковых включений (пор) по высоте напыленного слоя. Анализ экспериментальных данных показал, что с помощью частиц упрочняющей добавки можно регулировать уровень ос-

таточной пористости покрытий на основе самофлюсующихся сплавов [18]. Предложено два механизма удаления шлаковых включений из композиционных покрытий в процессе их оплавления: кинематической коагуляции (при всплывании частиц упрочняющей добавки) [19] и сорбции — коалесценции (в случае равномерного распределения тугоплавких зерен в напыленном слое) [20]. Моделированием механизма кинематической коагуляции получено аналитическое выражение для расчета остаточной пористости, позволяющее качественно и, в ряде случаев, количественно описать эксперимент:

$$N_{\text{ост}} = N_0 e^{-\frac{S \cdot (V_{\text{спл}} - V_{\text{пл}}) \cdot n \cdot t_{\text{опл}}}{V_{\text{пл}}^2}},$$

где S — поверхность частиц упрочняющей добавки; $V_{\text{спл}}$ — объем сплава; $V_{\text{пл}}$ — объем покрытия; n — доля частиц упрочняющей добавки; $t_{\text{опл}}$ — время оплавления.

Таким образом, в процессе оплавления создаются условия для регулирования уровня остаточной пористости композиционных покрытий с помощью частиц упрочняющей фазы.

6. Взаимодействие упрочняющих покрытий с окружающей средой при температуре выше 1000 °С и давлении (усилие пресса при штамповке деталей 250 тонн) в процессе их эксплуатации с образованием жаростойких фаз и фаз повышенной микротвердости (до 5000 кг/мм²). Так, одновременное воздействие износа, удара и повышенных температур при работе деталей горячих штампов приводит к изменению состава, структуры и свойств защитных покрытий. Например, в напыленных слоях, содержащих упрочняющие добавки следующего состава: Al, Cr, Al₂O₃, Cr₂O₃, CrB, — наблюдается увеличение в 3–4 раза количества оксидных фаз в результате окисления металла-связки (по данным высокотемпературного рентгенофазового анализа), что вместе с ростом числа межзеренных границ в тугоплавких частицах приводит к повышению износо-, жаро- и трещиностойкости покрытий.

Возможность управлять вышеописанными процессами позволила создать высококачественные покрытия специального назначения.

Выводы:

В условиях плазменного потока получены новые композиционные порошки и покрытия (градиентно-слоевые компози-

ты), характеризующиеся многослойной микро- и макроструктурой и переменным по сечению составом, с уникальными эксплуатационными свойствами.

Обнаружен, изучен и использован на практике ряд неизвестных ранее самоорганизующихся процессов модифицирования состава и структуры композиционных частиц и покрытий.

Литература

1. Клинская Н.А., Королева Е.Б., Петруничев В.А. Получение и свойства металлизированных боридных порошков // Физика и химия обработки материалов. — 1990. — №5. — С. 42–47.
2. Клинская Н.А., Копысов В.А., Петруничев В.А. Влияние металлизации тугоплавких порошков на триботехнические свойства плазменных покрытий // Защитные покрытия на металлах. — 1991. — Вып. 25. — С.56–59.
3. А.С. №1249958 (СССР). Клинская Н.А., Копысов В.А., Соловьев Л.В. и др. Порошковая смесь для газотермических покрытий.
4. А.С. №1215364 (СССР). Клинская Н.А., Копысов В.А., Гостенин А.А. и др. Порошковый материал для газотермических покрытий.
5. А.С. №1614303 (СССР). Клинская Н.А., Копысов В.А., Козьмин В.А., Неронов В.А. Способ изготовления порошка для напыления износостойких плазменных покрытий и его состав.
6. Гнедовец А.Г., Клинская Н.А., Петруничев В.А., Углов А.А. Особенности конденсационного роста оболочек при металлизации полидисперсных частиц // Теплофизика высоких температур. — 1988. — №3. — С. 549–554.
7. Клинская Н.А., Копысов В.А., Жилев В.А. Патент РФ №2088688. Способ нанесения износостойкого покрытия и его состав. Оpubл. 27.08.97. Бюл. №24.
8. Клинская Н.А., Копысов В.А., Цхай Е.В. Патент РФ №2085613. Композиционный порошок для газотермических покрытий. Оpubл. 27.07.97. Бюл. №21.
9. Кулик А.Я., Борисов Ю.С., Мнухин А.С., Никитин М.Д. Газотермическое напыление композиционных порошков. — Л.: Машиностроение, 1985. — 199с.
10. Клинская Н.А., Копысов В.А., Цхай В.А. и др. Патент РФ №1798376. Способ нанесения плазменных покрытий. Оpubл. 28.02.93. Бюл. №8.

11. Руденская Н.А., Жилиев В.А., Панкратов А.А. Особенности формирования и свойства плазменных композиционных покрытий типа стеллит-нитрид титана. // Защита металлов. — 1999. — Т. 35. — №1. — С. 1–4.

12. Клинская Н.А., Жилиев В.А. Патент РФ №2103112. Плакированный порошок и способ его получения. Оpubл. 27.01.98. Бюл. №3.

13. Евтушок Т.М., Жунковский Г.Л., Ильченко Н.С. и др. Детонационные покрытия на основе тугоплавких соединений титана // Защитные покрытия на металлах. — 1987. — Вып. 21. — С. 50–53.

14. Клинская-Руденская Н.А., Копысов В.А., Вилисов В.А., Бобов А.П. Взаимодействие Ni-Cr-B-Si-покрытий со сталью в процессе оплавления // Сварочное производство. — 1991. — №4. — С. 32–34.

15. Клинская-Руденская Н.А., Копысов В.А. Особенности композиционных покрытий на основе Ni-Cr-B-Si-сплава. Иссле-

дование микроструктуры покрытий // Физика и химия обработки материалов. — 1995. — №1. — С. 69–81.

16. Клинская-Руденская Н.А., Кузьмин Б.П. О влиянии тугоплавких добавок на структуру и свойства покрытий из самофлюсующихся сплавов // Физика и химия обработки материалов. — 1996. — №1. — С. 55–61.

17. Коломыцев П.Т. Структура сплавов никель-хром-бор // Докл. АН СССР. — 1962. — Т. 144. — №1. — С. 112–114.

18. Руденская Н.А., Жилиев В.А., Копысов В.А. Патент РФ № 2136777. Оpubл. 10.09.99. Бюл. №25.

19. Попель С.И., Никитин Ю.П., Бармин Л.А. и др. Взаимодействие расплавленного металла с газом и шлаком. Свердловск: УПИ, 1975. — 180 с.

20. Клинская-Руденская Н.А., Костогоров Е.П., Курылев М.В., Цхай Е.В. // Трение и износ. — 1999. — Т.20. — №1. — С. 74–79.

ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Представлен анализ проблемы применения электронно-лучевых технологий на предприятиях Беларуси. Дан обзор методов и оборудования для осуществления электронно-лучевого воздействия, определены перспективы использования плазменных источников электронов.

Одной из важнейших задач современного этапа развития машино- и приборостроения является повышение качества, надежности и долговечности деталей, узлов и механизмов. Эта проблема может быть решена только на основе комплексного подхода, включающего как создание новых материалов, освоение новых эффективных технологий, так и разработку соответствующего оборудования, обеспечивающего реализацию таких технологий.

Электронно-лучевые технологии занимают существенное место в ряду современных высокоэффективных методов металлообработки и получения материалов с новыми свойствами. Расширение области применения такого рода технологий в промышленности Беларуси необходимо как для повышения качества и надежности изделий, так и для роста их конкурентоспособности, поскольку использование современных технологий, в том числе и электронно-лучевых, соответствует требовани-

ям европейских и международных стандартов качества (ISO).

Возможности технологического применения электронно-лучевого воздействия изучались с начала XX века. До 1940 г. уже было создано лабораторное оборудование для электронно-лучевой наплавки и сверления. С развитием вакуумной техники и появлением актуальных технических задач соединения, обработки и получения новых материалов в середине XX века начался период активной разработки и промышленного использования электронно-лучевых технологий. В первую очередь это было обусловлено бурным развитием ядерной энергетики и ракетно-космической техники.

За исторически короткий промежуток времени в мире выполнен огромный объем исследований и разработок в области электронно-лучевых технологий, основные из которых направлены на повышение производительности и снижение

В.А. Труздев,

доктор
технических наук,
профессор,
заведующий
кафедрой физики,

В.Т. Залесский,

кандидат
технических наук,
доцент кафедры
физики,

Д.А. Антонович,
Ю.П. Голубев,
аспиранты.

Полоцкий
государственный
университет.