

**ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И., ГРУЗДЕВ В. А., СНАРСКИЙ А. С.,
ЗАЛЕССКИЙ В. Г., СОРОГОВЕЦ В. И.**

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА БОРСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ
И ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО
ОБОРУДОВАНИЯ
И ТЕХНОЛОГИЙ УПРОЧНЕНИЯ
И ВОССТАНОВЛЕНИЯ**

ПОЛОЦК: ПГУ
МИНСК
УП «ТЕХНОПРИНТ»
2005

УДК 621.791.92

ББК

Закономерности электронно-лучевого воздействия на борсодержащие материалы и принципы оптимизации электронно-лучевого оборудования и технологий упрочнения и восстановления: Монография / Пантелеенко Ф. И., Груздев В. А., Снарский А. С., Залесский В. Г., Сороговец В. И. — Мн.: Технопринт; Полоцк: ПГУ, 2005 —

ISBN 985-418-229-0

В данной монографии приведены результаты исследований и полученные закономерности электронно-лучевого воздействия (ЭЛВ) на борсодержащие материалы, а также принципы оптимизации формирования электронных пучков для реализации электронно-лучевых технологий закалки, аморфизации, модификации поверхностных свойств материалов в производственных процессах восстановления и упрочнения деталей машин и конструкций. Проведенные исследования показали эффективность применения поверхностной закалки указанных покрытий из жидкого состояния с использованием электронно-лучевых технологий. Работы выполнялись при финансовой поддержке Белорусского Республиканского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № Т99-342 «Исследование закономерностей электронно-лучевого воздействия на борсодержащие материалы и принципов оптимизации электронно-лучевого оборудования для технологии упрочнения и восстановления»).

© Ф.И. Пантелеенко; В.А. Груздев;
А.С. Снарский и др., 2005 г.

ISBN 985-418-229-0

© Оформление УП «Технопринт»

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	
1. ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ И СПОСОБОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ	
1.1. Выбор порошковых материалов для создания наплавленных покрытий с целью их последующей электронно-лучевой обработки	
1.2. Статистический анализ восстанавливаемых деталей с точки зрения возможности применения электронно-лучевых технологий	
1.3. Выбор способа и предварительных режимов нанесения покрытий из борсодержащих материалов	
2. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	
2.1. Выбор методики определения трещиностойкости наплавленных покрытий	
2.2. Методика определения скорости охлаждения покрытий системы Fe-B-л. э.	
2.3. Разработка методики определения коэффициента температуропроводности покрытий	
2.4. Исследование теплофизических свойств покрытий	
2.5. Выводы по главе	
3. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЯЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ	
3.1. Электронно-лучевой энергокомплекс на базе пушки с плазменным эмиттером	
3.2. Выводы по главе	
4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА НА МАТЕРИАЛЫ	
4.1. Постановка задачи теплофизического воздействия электрон-	

ным лучом на материалы	
4.2. Выбор схемы расчета	
4.3. Анализ результатов моделирования теплофизического воздействия	
4.4. Выводы по главе	
5. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ (ПЛАЗМЕННЫХ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ) НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Fe-B-л. э.	
5.1. Влияние технологических режимов нанесения на структуру и свойства покрытий	
5.2. Общие закономерности изменения структуры и свойств покрытий системы Fe-B-л. э. после ЭЛВ	
5.3. Особенности электронно-лучевой обработки наплавленных покрытий системы Fe-B-C-W-Mo-Cr	
5.4. Эксплуатационные испытания деталей и инструментов с покрытиями из материалов системы Fe-B-л. э. после проведения электронно-лучевой обработки	
5.5. Выводы по главе	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
ЛИТЕРАТУРА	

ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеенко Ф. И., Снарский А. С. Ресурсосберегающая технология получения боросодержащего инструментального материала // Материалы, технологии, инструмент. — 1998. — № 4. — С. 98—101.
2. Снарский А. С. Создание боросодержащего материала для металлорежущих инструментов / автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Минск, 1998. — 18 с.
3. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь, В. С. Ивашко, А. Ф. Ильюшенко и др. — Мн.: Беларуская навука, 1998. — 583 с.
4. Дорожкин Н. Н., Петюшев Н. Н. Дуговая газопорошковая наплавка. — Мн.: Беларусь, 1989. — 94 с.
5. Пантелеенко Ф. И., Любецкий С. Н. Материалы, технология и оборудование для восстановления и упрочнения деталей машин. Учебное пособие. Часть 1. Наплавка и напыление. — Новополоцк: ПГУ, 1994. — 116 с.
6. Ворошнин Л. Г., Пантелеенко Ф. И., Константинов В. М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. — Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 1999. — 133 с.
7. Пантелеенко Ф. И., Снарский А. С. Особенности трибологического поведения пары боросодержащий инструментальный материал — деталь // Трение и износ, т. 18, № 4, 1997. — С. 518—522.
8. Константинов В. М., Штемпель О. П., Жабуренок С. Н. Разработка диффузионно-легированных порошков из стружки для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих инструментов // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин. Тематический сборник. — Новополоцк: ПГУ, 1999. — С. 32—34.
9. Патент BY1411C1. Состав порошка для наплавки / Пантелеенко Ф. И., Константинов В. М., Снарский А. С.
10. Снарский А. С. Создание боросодержащего материала для металлорежущих инструментов / диссертация на соискание степени к. т. н. — Минск, 1998. — 179 с.
11. Пантелеенко Ф. И., Константинов В. М., Штемпель О. П. Особенности получения диффузионно-легированных порошков в динамических смесях // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин. Тематический сборник. — Новополоцк: ПГУ, 1999. — С. 48—51.
12. Пантелеенко Ф. И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них. — Мн.: УП «Технопринт», 2001. — 300 с.

13. Глухов В. П. Боридные покрытия на железе и стали. — Киев: Наукова думка, 1970. — 197 с.

14. Пантелеенко Ф. И., Константинов В. М. Исследование износостойкости эвтектических покрытий из ДПС порошков // Трение и износ. — 1994. — Т. 15, № 2. — С. 243—247.

15. Ящерицын П. И., Еременко М. Л., Фельдштейн Е. Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов. — Минск: Выш. шк., 1990. — 512 с.

16. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. — М.: Металлургия, 1975. — 584 с.

17. Бякова А. В., Горбач В. Г., Власов А. А. Оценка трещиностойкости боридных покрытий на металлах и сплавах по критериям разрушения // Сверхтвердые материалы. — 1986. — № 3. — С. 18—23.

18. Гуляев А. П. Сопротивление хрупкому разрушению // МиТОМ. — 1992. — № 2. — С. 21—25.

19. Гуляев А. П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1986. — 544 с.

20. Бякова А. В., Горбач В. Г., Власов А. А. Выбор условий шлифования боридных покрытий на основе сравнительной оценки вязкости разрушения // Изв. вузов. Машиностроение. — 1989. — № 6. — С. 137—139.

21. Моисеев В. Ф., Фукс-Рабинович Г. С., Досбаева Г. К. Вязкость и пластичность ионно-плазменных покрытий из нитрида титана // Заводская лаборатория. — 1990. — № 1. — С. 57—59.

22. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.

23. Явцева И. В. Структура и свойства порошковых быстрорежущих сталей после лазерной обработки // МиТОМ. — 1988. — № 4. — С. 48—50.

24. Теория сварочных процессов / Под ред. В. В. Фролова. — М.: Высшая школа. 1988. — 559 с.

25. Особенности формирования структуры и свойств поверхностного слоя стали при облучении пучком релятивистских электронов / И. М. Полетика, М. Д. Борисов, Г. В. Краев и др. // МиТОМ. — 1997. — № 4. — С. 13—17.

26. Калинушкин Е. П., Аршава Е. В., Якушев О. С. Влияние скорости охлаждения при кристаллизации порошковых быстрорежущих сталей на формирование их первичной структуры // МиТОМ. — 1987. — № 9. — С. 13—17.

27. Абрамов О. В., Огонян Р. А., Огонян Я. Н. Особенности структуры и свойств микрокристаллической инструментальной стали, полученной методом закалки из жидкого состояния // ПМ. — 1988. — № 10. — С. 89—93.

28. Шипко А. А., Поболь И. Л., Урбан И. Г. Упрочнение сталей с использованием электронно-лучевого нагрева. — Минск: Наука і

техніка, 1995. — 280 с.

29. Исследование кристаллизации металлических порошков, получаемых путем распыления жидкой фазы / А. К. Петров, И. С. Мирошниченко, В. В. Парабин и др. // ПМ. — 1973. — № 1. — С. 16—20.

30. Исследования распыленных порошковых сталей / Л. П. Короткова, Г. Г. Мухин, М. С. Павлов и др. // Изв. вузов. Машиностроение. — 1980. — № 6. — С. 91—94.

31. Огонян Р. А., Огонян Я. Н., Рошупкин А. Г. Структурные превращения в борсодержащей быстрорежущей стали, полученной закалкой из расплава // МиТОМ. — 1996. — № 9. — С. 12—16.

32. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1981. — 279 с.

33. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства материалов при высокой температуре. М.: Металлургия, 1989. — 384 с.

34. Баскакова А. А., Зиновьев В. Е., Загребин Л. Д. Измерение температуропроводности полусферических образцов // ИФЖ. — Т. XXVI. — 1974. — С. 1058—1061.

35. Зиновьев В. Е., Баскакова А. А., Коршунов Н. Г. и др. Температуропроводность и теплопроводность твердого и жидкого олова // ИФЖ. — Т. XXV. — 1973. — С. 490—494.

36. Голуц С. Г., Зиновьев В. Е., Полев В. Ф. и др. Температуропроводность и теплопроводность молибдена в твердом и жидком состоянии // ФММ. — 1984. — Т. 58. — № 3. — С. 617—619.

37. Филиппов Л. П., Юрчак П. О. О высокотемпературных исследованиях тепловых свойств твердых тел // ИФЖ. — 1971. — Т. XXI. — С. 561—577.

38. Артюхин Е. А., Иванов Г. А., Некрасов А. В. Определение комплекса теплофизических характеристик материалов по данным нестационарных измерений температур // ТВТ. — 1993. — Т 31, — № 2. С. 56—58.

39. Экспериментальная установка для исследования теплопроводности и теплоемкости сталей и сплавов при температурах 200...1000 °С. Под рук. В. В. Сычева. Отчет о НИР по теме № 10968600. Московский энергетический институт.

40. Тайц Н. Ю., Гольфорт Э. М. Методика определения коэффициента температуропроводности и теплопроводности сталей // Заводская лаборатория. — 1950. — Т. 16. — № 3. — С. 38—42.

41. Кудинов В. В., Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. — М.: Машиностроение, 1981. — 192 с.

42. Уткин О. И., Коршаков Л. Н., Иванов В. М. и др. Исследование теплопроводности и свойств плазмонапыленных покрытий из окиси алюминия и двуокиси циркония // Вопросы атомной науки и техники. — Вып.

4. — 1974. — С. 59—68.

43. Вирник А. М., Мельников В. Е., Телегин Г. П. и др. Свойства и применение плазмонапыленных материалов в конструкциях МГД генератора. В кн.: Жаростойкие покрытия для защиты конструкционных материалов. — Л.: Наука, 1977. — С. 173.

44. Иванов В. М., Калинин Г. М., Кузовиткин В. Ф. Измерение теплопроводности плазменных керамических покрытий // ФиХОМ. — 1976. — № 1. — С. 57—60.

45. Акименко А. О., Гуськов А. И., Катков И. Н. и др. К вопросу теплопроводности покрытий, полученных способом плазменного напыления. В кн.: Металловедение. Вып. 14. — Л.: Судостроение, 1970. — С. 269—274.

46. Алексашенко А. А. Аналитические исследования нелинейных обратных (инверсных) задач теплопроводности // Известия академии наук СССР. Энергетика и транспорт. — № 4. — 1976. — С. 111—116.

47. Сороговец В. И. Исследование теплофизических характеристик плазменных борсодержащих покрытий. Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: Тематический сборник II Республиканской НТК. — Новополюцк, 1995. — С. 104—105.

48. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. — М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. — 356 с.

49. Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Липецкий Я. Л. Физические свойства металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1980. — 320 с.

50. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М. А. Завьялов, Ю. Е. Крейнделъ, А. А. Новиков, Л. П. Шантурин. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 212 с.

51. Особенности электропитания электронных пушек с плазменным катодом. В кн.: Источники электронов с плазменным эмиттером / Под ред. Ю. Е. Крейнделъ. — Новосибирск: Наука, 1983. — С. 91—95.

52. Крейнделъ Ю. Е. Плазменные источники электронов. — М.: Атомиздат, 1977. — 145 с.

53. Королев Ю. Н. Тиристоры. — М.: Знание, 1968. — 64 с.

54. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, П. В. Зуев, А. Н. Кокора. — М.: Машиностроение, 1985. — 496 с.

55. Глытенко А. Л., Любов Б. Я. Импульсно-периодический нагрев металлов // Инж.-физ. журн. — 1987. — 53, № 4. — С. 642—648.

56. Взаимодействие излучения импульсно-периодического $HeCl$ — лазера с металлами / Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, В. М. Борисов и др. // Квантовая электроника. — 1990. — Т. 17. — № 10. — С. 1321—1326.

57. Чернига Р. М., Однороженко И. Г. Исследование процессов плавления и испарения металлов при действии серии импульсов лазерного излу-

- чения // Промышленная теплотехника. — 1991. — Т. 13, № 4. — С. 51—59.
58. Рыкалин Н. Н. Расчет тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
59. Рыкалин Н. Н. Лазерная обработка материалов. — М.: Машиностроение, 1975.
60. Рыкалин Н. Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
61. Рыкалин Н. Н., Углов А. А. Нагрев тонких листов при сварке лазером // ДАН СССР. — 1965. — Т. 165. — № 2. — С. 319—322.
62. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Макаров Н. И. Нагрев двухслойной пластины при сварке световым потоком лазера // ДАН СССР. — 1966. — Т. 169. — № 3. — С. 565—568.
63. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Низаметдинов М. М. Расчет нагрева материалов лазерным излучением с учетом температурной зависимости теплофизических коэффициентов // Квантовая электроника. — 1977. — Т. 4. — № 7. — С. 1509—1516.
64. Справочник инструментальщика / Под общ. ред. И. А. Ординарцева. — Л.: Машиностроение, 1987. — 846 с.
65. Plasma source of charged particles based on superdense pulse glow discharge / V. A. Gruzdev, V. G. Zalesski, D. A. Antonovich, Yu. P. Goloubey // Proc. III Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk, 2000. — Vol. I. — P. 60—63.
66. Gruzdev V. A., Zalesski V. G. Disturbance of the gas-discharge plasma by switching of electron current to a probe // Proc. III Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk, 2000. — Vol. I. — P. 153—156.
67. Залесский В. Г., Снарский А. С., Сороговец В. И. Особенности электронно-лучевого воздействия на борсодержащие износостойкие наплавленные покрытия // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. трудов / Под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя. — Мн.: Технопринт, Новополоцк: ПГУ, 2001. — С. 378—381.
68. Антонович Д. А., Голубев Ю. П., Залесский В. Г., Маняк А. Г. Плазменный электронно-ионный источник для термической модификации поверхностей материалов // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. трудов / Под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя. — Мн.: Технопринт, Новополоцк: ПГУ, 2001. — С. 369—372.
69. Gruzdev V. A., Zalesski V. G. Processes of self-organizing in plasma at simulated local infringement of its quasi-neutrality // Proc. X Annual Seminar on Nonlinear Phenomena In Complex Systems. — Minsk, 2001 (in press).
70. Изучение влияния электронно-лучевого воздействия на структу-

ру и свойства боридостали / Ф. И. Пантелеенко, В. Г. Залесский, А. С. Снарский, В. И. Сороговец // 6-я Межд. конф. «Пленки и покрытия 2001»: Труды конф. / Под ред. В. С. Клубникина. — СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001. — С. 582—586.

71. Пантелеенко Ф. И., Снарский А. С. Исследование влияния электронно-лучевой обработки на эксплуатационные свойства борсодержащего материала лезвийного металлорежущего инструмента // Вісник ЖІТІ. — 2001 / Технічні науки. — С. 242—243.

72. Патент ВУ 469 У, МПК Н 01J 3/04, выдан 8.11.2001. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения / Груздев В. А., Залесский В. Г., Голубев Ю. П. — № u20010194; Заявл. 31.07.2001; Опубл. 30.03.2002 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства РБ. — 2002. — № 1(32). — С. 221—222.

73. Пантелеенко Ф. И., Снарский А. С. Способ нанесения инструментальных покрытий на пластины металлорежущих инструментов. Заявка на патент РБ № a20020266 от 02.04.02 г.

74. Сороговец В. И. Влияние режимов плазменной порошковой наплавки на пористость, структуру и микротвердость борсодержащих покрытий // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: С. научн. трудов / Под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя — Мн.: Технопринт, Новополоцк: ПГУ, 2001. — С. 93—98.

75. Сороговец В. И. Получение износостойких покрытий плазменной наплавкой и диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01. Материаловедение в машиностроении. Новополоцк: ПГУ. — 26 с.

76. Груздев В. А., Залесский В. Г., Антонович Д. А., Голубев Ю. П. Плазменные источники электронов с пучком большого сечения // ИФЖ. — 2002. — Т. 75. — Вып. 3. — С. 166—170.