



А.Г. Соколов
В.В. Иосифов
А.Г. Схиртладзе

**ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ
ТРЕБУЕМЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ
(ПОКРЫТИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ)**

А.Г. Соколов, В.В. Иосифов, А.Г. Схиртладзе

**ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ
ТРЕБУЕМЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ
МАШИНОСТРОЕНИЯ
(ПОКРЫТИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ)**

Учебное пособие

Допущено Учебно-методическим объединением вузов
по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ)
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
«Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»

**Краснодар
2016**

УДК 621.793(075.8)
ББК 34.663я73
С59

Рецензенты:

*Н.Б. Абрамова, канд. техн. наук, доцент;
В.М. Логвин, директор по новой технике
ОАО «Краснодарский завод тяжелого машиностроения»*

С59 Соколов, Александр Григорьевич.

Технологии формирования требуемых механических и физико-химических свойств поверхностей изделий машиностроения (покрытия в машиностроении) : учебное пособие / А.Г. Соколов, В.В. Иосифов, А.Г. Схиртладзе. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2016. – 212 с.

ISBN 978-5-91718-447-0

В учебном пособии рассмотрены основные технологии, применяемые в машиностроении для формирования требуемых механических и физико-химических свойств поверхностных слоев изделий, их сущность, влияние состава и структуры поверхностных слоев изделий, а также применяемых технологий на работоспособность изделий. Даны рекомендации по выбору состава, методов и способов нанесения покрытий на конструкционные и инструментальные материалы.

Учебное пособие предназначено для студентов, магистров и аспирантов машиностроительных специальностей, а также для инженерно-технических работников предприятий машиностроительного профиля.

ББК 34.663я73
УДК 621.793(075.8)

ISBN 978-5-91718-447-0

© А.Г. Соколов, 2016
© В.В. Иосифов, 2016
© А.Г. Схиртладзе, 2016
© Оформление ООО «Издательский Дом – Юг», 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
Раздел 1. Роль поверхностных слоев материала изделий в обеспечении их работоспособности	7
Раздел 2. Повышение эксплуатационных свойств деталей машиностроения путем нанесения покрытий	9
2.1 Коррозионностойкие покрытия	10
2.1.1 Защита от коррозии металлическими покрытиями	12
2.1.2 Неметаллические коррозионностойкие покрытия	17
2.2 Жаростойкие покрытия	24
2.2.1 Требования, предъявляемые к жаростойким покрытиям	25
2.2.2 Материалы для жаростойких покрытий	26
2.3 Износостойкие покрытия	32
2.3.1 Общие сведения о видах изнашивания	32
2.3.2 Материалы для износостойких и антифрикционных покрытий	35
<i>Контрольные вопросы к разделам 1, 2</i>	46
Раздел 3. Технологии нанесения покрытий	48
3.1 Критерии оценки прогрессивности технологических процессов нанесения покрытий	48
3.2 Основные методы и способы нанесения покрытий	48
<i>Контрольные вопросы к разделу 3</i>	56
Раздел 4. Основные способы нанесения покрытий, применяемые а машиностроении	57
4.1 Электрохимические покрытия	57
4.1.1 Способы получения покрытий из водных растворов	58

4.1.2	Электрохимические покрытия из расплава	62
4.1.3	Способы получения покрытий из газовой фазы	62
4.1.4	Электроискровой способ формирования покрытий	64
<i>Контрольные вопросы к подразделу 4.1</i>		65
4.2	Химические покрытия	66
4.2.1	Способы нанесения химических покрытий из растворов	66
4.2.2	Химическое осаждение из паровой фазы	70
4.2.3	Применение CVD покрытия в машиностроении ...	74
<i>Контрольные вопросы к подразделу 4.2</i>		76
4.3	Физические способы получения покрытий	76
4.3.1	Способы термического испарения и конденсации	77
4.3.2	Способы получения покрытий ионным распылением	87
4.3.3	Способ ионного осаждения	92
4.3.4	Способ ионной имплантации (ионного легирования)	95
4.3.5	Применение PVD покрытий	100
<i>Контрольные вопросы к подразделу 4.3</i>		102
4.4	Химико-термические методы получения покрытий	103
4.4.1	Цементация	105
4.4.2	Азотирование	110
4.4.3	Способы одновременного насыщения азотом и углеродом	116
4.4.4	Борирование	118
4.4.5	Силицирование	123
4.4.6	Диффузионная металлизация	127
<i>Контрольные вопросы к подразделу 4.4</i>		146
4.5	Термомеханические покрытия	148
4.5.1	Напыление	149
4.5.2	Наплавка	160
4.5.3	Плакирование	174
<i>Контрольные вопросы к подразделу 4.5</i>		178

Раздел 5.

Нанопокрyтия и способы их получения	180
5.1 Понятие нанообъекта, наноматериала	180
5.2 Нанопокрyтия	182
5.3 Способы получения нанопокрyтий	185
5.3.1 Химические способы	186
5.3.2 Электрохимические способы	187
5.3.3 Способы физического осаждения PVD	189
5.3.4 Метод наноструктурирования предварительно нанесенных макропокрyтий интенсивным пластическим деформированием	196
<i>Контрольные вопросы к разделу 5</i>	<i>198</i>

Раздел 6.

Общие принципы выбора материала покрyтий и способа его нанесения	200
<i>Контрольные вопросы к разделу 6</i>	<i>203</i>
Литература	204

ЛИТЕРАТУРА

1. Арзамасов В.Б. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебник / В.Б. Арзамасов, А.Н. Волчков. – М. : Академия, 2009. – 448 с.
2. Покрытия для деталей машиностроения / Т.И. Иванова, А.Г. Соколов, С.К. Конев, А.В. Сивенков. – Л. : ЛМИ, 1989. – 89 с.
3. Соколов А.Г. Повышение работоспособности инструмента методами диффузионной металлизации / А.Г. Соколов, В.П. Артемьев. – Ростов н/Д. : Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – 228 с.: ил.
4. Схирталадзе А.Г. Технологические процессы машиностроительного производства : учебник для вузов / А.Г. Схирталадзе, Ю.М. Соломенцев. – М. : Учебная литература, 2010.
5. Абраимов Н.В. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов / Н.В. Абраимов, Ю.С. Елисеев. – М. : Интернет Инжиниринг, 2001. – 622 с.
6. Хрущев М.М. Повышение износостойкости сталей путем поверхностных упрочнений за счет термических, химико-термических обработок, нанесения покрытий и наплавки // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – № 5. – С. 44–48.
7. Сюр Т.А. Влияние термической и химико-термической обработок на коррозионную стойкость сталей в сероводородсодержащей среде / Т.А. Сюр, Н.А. Кичигина // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 10. – С. 62–64.
8. Гузанов Б.Н. Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении / Б.Н. Гузанов, С.В. Косицын, Н.Б. Пугачева. – Екатеринбург : УрО РАН, 2003. – 244 с.
9. Филиппов М.А. Поверхностная обработка и покрытия в машиностроении : учеб. пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов «Металлургия» / М.А. Филиппов, И.И. Косицына, М.А. Гервасьев; науч. ред. – В.Р. Бараз; Федеральное агентство по образованию, Уральский гос. технический ун-т – УПИ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2009.
10. Функциональные покрытия в сельскохозяйственном машиностроении / А.В. Серов, Н.В. Серов, П.И. Бурак, Р.А. Латыпов // Международный научный журнал. – 2014. – № 6. – С. 71–77.

11. Инструментальные материалы : учебное пособие / Г.А. Воробьева, Е.Е. Складнова, А.Ф. Леонов, В.К. Ерофеев. – СПб. : Политехника, 2005. – 314 с.

12. Стали и сплавы. Марочник: справ. изд. / В.Г. Сорокин и др.; науч. ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева. – М. : Интермет Инжиниринг, 2003. – 608 с.

13. Красиков А.В. Технологические особенности нанесения покрытий из коррозионно-стойких наноструктурированных сплавов никель-вольфрам методом электрохимического осаждения / А.В. Красиков, М.С. Первухина // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 3 (67). – С. 117–124.

14. Патент № 2063484 МПК⁶ C25D5/06 Электрод для нанесения гальванического покрытия методом электрохимического натирания / А.Н. Новиков. – Оpub. 10.06.1996.

15. Галанин С.И. Теоретические основы электрофизических методов обработки металлических поверхностей и нанесения гальванических покрытий : учеб. пособие / С.И. Галанин; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Костром. гос. технол. ун-т. – Кострома, 2005.

16. Восстановление поверхности деталей автотракторной техники методом химического осаждения никеля / А.Г. Схиртладзе, В.А. Скрябин, Г.И. Свечникова, О.В. Пименова // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – № 11. – С. 11–14.

17. Антихович И.В. Электрохимическое осаждение никеля из ацетатно-хлоридного электролита в присутствии ацетата аммония / И.В. Антихович, А.А. Черник, И.М. Жарский // Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География. – 2014. – № 1. – С. 15–20.

18. Буклагина Г.В. Химическое никелирование – перспективный метод нанесения покрытий при восстановлении деталей машин // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. – 2004. – № 1. – С. 295.

19. Корнеев А.А. Исследование трибологических свойств композиционного покрытия, нанесенного фрикционно-химическим способом // Вестник Ассоциации ВУЗов туризма и сервиса. – 2008. – № 4. – С. 6–11.

20. Гадалов В.Н. Упрочнение режущего инструмента способом локального электроискрового нанесения покрытий / В.Н. Гадалов, Ю.В. Болдырев // СТИН. – 2006. – № 9. – С. 18–20.

21. Новые способы повышения коррозионной стойкости металлов химико-термической обработкой при анодном электролитическом нагреве / В.В. Паршутин, Е.А. Пасинковский, А.М. Парамонов, А.В. Коваль, Н.В. Чернышева // Электронная обработка материалов. – 2012. – Т. 48. – № 1. – С. 88–92.

22. Колмыков В.И. Повышение долговечности корпусов шнековых буровых долот химико-термической обработкой / В.И. Колмыков, В.В. Горожанкин, Д.Н. Романенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 9. – С. 283–288.

23. Сыркин В.Г. CVD-метод. Химическое парофазное осаждение. – М. : Наука, 2000.

24. Получение и свойства износостойких комбинированных PVD/CVD – покрытий на твердосплавном инструменте / И.В. Блинков, В.Н. Аникин, Р.В. Кратохвил и др. // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2010. – № 1. – С. 37–43.

25. Локтев Д. Способы селективного нанесения покрытий на различные детали / Д. Локтев, Е. Ямашкин // Наноиндустрия. – 2007. – № 4. – С. 18–25.

26. Смоланов Н.А. Исследование структуры и адгезионных свойств покрытий, полученных ионно-плазменным методом // Технология неорганических веществ и материалов. – 2005. – № 17.

27. Мансиа Салахалдин. Повышение эксплуатационного ресурса твердосплавных режущих пластин химико-термической обработкой : дис. ... канд. техн. наук / Мансиа Салахалдин; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – СПб., 2011.

28. Ворошнин Л.Г. Химико-термическая обработка микрообъектов / Л.Г. Ворошнин, О.Л. Менделеева // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 1. – С. 15–19.

29. Кухарева Н.Г. Химико-термическая обработка в тлеющем разряде атмосферного давления / Н.Г. Кухарева, М.А. Силенков, С.В. Шушков // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – № 1. – С. 36–38.

30. Калашников А.С. Химико-термическая обработка зубчатых колес с использованием газовой вакуумной цементации /

А.С. Калашников, Ю.А. Моргунов, П.А. Калашников // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2013. – № 10 (199). – С. 12–16.

31. Клейнер Л.М. Химико-термическая обработка низкоуглеродистой мартенситной стали 12Х2Г2НМФБ в расплавах солей / Л.М. Клейнер, Д.М. Ларинин, А.А. Шацов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2011. – Т. 13. – № 4. – С. 93–106.

32. Соколов А.Г. Диффузионная металлизация в среде легкоплавких расплавов как способ повышения стойкости инструмента // Научная мысль Кавказа. – 2006. – № 1. – С. 159–168.

33. Соколов А.Г. Разработка теоретических и технологических основ повышения стойкости режущего и штампового инструмента за счет диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов: дис. ... д-ра техн. наук / А.Г. Соколов; ФГОУ ВПО «КубГТУ». – Краснодар, 2008. – 354 с. – библиогр.: 227.

34. Соколов А.Г. Диффузионная металлизация твердых сплавов – способ повышения работоспособности режущего инструмента и качества обработки труднообрабатываемых сплавов / А.Г. Соколов, С. Мансиа // Технология металлов. – 2011. – № 7. – С. 40–45.

35. Соколов А.Г. Механизм и особенности формирования диффузионных никель-медных покрытий из среды легкоплавких жидкометаллических растворов / А.Г. Соколов, С. Мансиа // Технология металлов. – 2012. – № 2. – С. 38–43.

36. Соколов А.Г. Повышение стойкости режущего и штампового инструмента посредством диффузионной металлизации // Главный механик. – 2010. – № 11. – С. 20–27.

37. Термическое напыление вместо электролитического хромирования РЖ 19Л. Технология неорганических веществ и материалов. – 2006. – № 21.

38. Коломейченко А.В. Влияние дистанционного напыления на физико-механические свойства при упрочнении газопламенным напылением рабочих поверхностей лап культиваторов / А.В. Коломейченко, С.А. Зайцев // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2013. – № 5. – С. 32–33.

39. Буклагина Г.В. Эффективная технология восстановления коленчатых валов (газотермическое напыление) // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. – 2005. – № 3. – С. 899.

40. Аргонодуговая наплавка износостойких композиционных покрытий / Н.В. Коберник, Г.Г. Чернышов, Р.С. Михеев, Т.А. Чернышова, Л.И. Кобелева // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – № 1. – С. 51–55.

41. Улучшение противоизносных свойств покрытий, полученных газодинамическим напылением // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. – 2005. – № 4. – С. 1215.

42. 06.20-19Л.102 Моделирование процесса разгона тяжелых частиц газовой детонацией в установках детонационного напыления // РЖ 19Л. Технология неорганических веществ и материалов. – 2006. – № 20.

43. Машрабов Н. Скоростная электродуговая наплавка цилиндрических деталей // Международный научный журнал. – 2010. – № 1. – С. 43–46.

44. Заяров Ю.В. Плазменная сварка и наплавка с присадочной проволокой толстостенных металлоконструкций : автореферат дис. ... канд. техн. наук. – М., 1993.

45. Электрошлаковая наплавка ленточным электродом с использованием специальных флюсов деталей атомно-энергетического и нефтехимического оборудования / Е.Г. Старченко, В.Ю. Мастенко, Ю.С. Волобуев, В.Д. Ходаков // Сварочное производство. – 2011. – № 10. – С. 22–27.

46. Индукционная наплавка в разделку кромок высоколегированным белым чугуном деталей сельхозмашин / В.В. Иванайский, Н.Т. Кривочуров, Е.А. Иванайский, С.М. Шанчуров // Сварочное производство. – 2012. – № 1. – С. 42–44.

47. Электронно-лучевая наплавка покрытий порошками Быстрожежущей стали Р6М5 / П.А. Прибытков, М.Н. Храмогин, В.В. Коржова, В.Г. Дураков // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 4. – С. 63–66.

48. Переплетчиков Е.Ф. Плазменная наплавка // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2005. – № 12. – С. 35–40.

49. Зотов А.В. Оценка износостойкости направляющих скольжения, подвергнутых плакированию / А.В. Зотов, О.И. Драчев // Металлообработка. – 2013. – № 3 (75). – С. 5–10.

50. Фрикционное плакирование металлом по металлу. Часть 1 / Л.С. Белевский, С.А. Тулупов, О.М. Смирнов, Я. Гордон, И.Л. Белевский // *Металлург.* – 2006. – № 10. – С. 33–38.

51. Фрикционное плакирование металлом по металлу. Часть 2 / Л.С. Белевский, С.А. Тулупов, О.М. Смирнов, Я. Гордон, И.Л. Белевский // *Металлург.* – 2006. – № 11. – С. 36–38.

52. Яковлев И.В. Взрывное плакирование торцевой поверхности металлической цилиндрической заготовки / И.В. Яковлев, В.М. Оголихин // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение.* – 2011. – Т. 13. – № 2. – С. 35–39.

53. Кочанов Д.И. Наноматериалы и нанотехнологии для машиностроения: состояние и перспективы применения // *Нанотехника.* – 2011. – № 2. – С. 30–34.

54. Плакирование методами холодной ОМД. Композиционные материалы : учебное пособие / С.И. Платов и др.; М-во образования и науки Российской Федерации, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2009.

55. Локтев Д. Промышленные нанотехнологии методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий / Д. Локтев, Е. Ямашкин. // *Наноиндустрия.* – 2007. – № 4.

56. Способ получения пленочных покрытий оксида олова на подложках / Н.Т. Кузнецов, В.Г. Севастьянов, Е.П. Симоненко, П.А. Игнатов, В.С. Попов. – Заявка на патент РФ № 2009124114 от 25.06.09.

57. Gram-Scale CCVD Synthesis of Double-Walled Carbon Nanotubes / E. Flahaut, R. Bacsa, A. Peigney, C. Laurent // *Chemical Communications.* – 2003. – № 12 (12). – P. 1442–1443.

58. H. Suzuki et al. // *Chemical Physics Letters.* – 2009. – № 468. – P. 211–215.

59. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М. : Издательский центр «Академия», 2005. – 192 с.

60. Пул Ч. Мир материалов и технологий. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. – М. : Техносфера, 2004. – 327 с.

61. Гусев А.И. Нанокристаллические материалы / А.И. Гусев, А.А. Ремпель. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 224 с.

62. Миттова И.Я. Наноматериалы: синтез нанокристаллических порошков и получение компактных нанокристаллических материалов : учебное пособие / И.Я. Миттова, Е.В. Томина, С.С. Лаврушина. – Воронеж : Издательство ВГУ, 2007. – 35 с.

63. Алымов М.И. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов / М.И. Алымов, В.А. Зеленский. – М. : МИФИ, 2005. – 52 с.

64. A study of phase and structural transformations of hardened low-carbon steel under conditions of multiple intense heat effect / D.O. Panov, Yu.N. Simonov, P.A. Leont'ev, A.I. Smirnov and L.Ts. Zayats // Metal Science and Heat Treatment. – March, 2013. – Vol. 54. – Nos. 11–12. – P. 582–586.

65. Водин Д.В. Применение нанопокровтий для повышения стойкости режущего инструмента и основные методы их нанесения // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2014. – № 2. – С. 67–68.

66. Формирование золь-гельным методом просветляющих двухслойных $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ покрытий / Д.Л. Коваленко, В.Е. Гайшун, В.В. Васькевич, Н.А. Алешкевич, А.М. Гришкевич // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2012. – № 6 (75). – С. 63–68.

67. Наноккомпозитные вакуумно-дуговые покрытия TiC/A-SiN , полученные с дополнительной ионизацией ацетиленом / И.Ш. Трахтенберг, Н.В. Гаврилов, Д.Р. Емлин, С.А. Плотников, А.Б. Владимиров, Е.Г. Волкова, А.П. Рубштейн // Физика металлов и металловедение. – 2014. – Т. 115. – № 7. – С. 771.

68. URL: www.nanometer.ru

69. Патент 2391358), МПК C08J5/18 (2006.01); C08J3/28 (2006.01); C23C16/18 (2006.01); B82B3/00 (2006.01). Способ получения металлоуглеродных нанопокровтий / Е.В. Гуренцов (RU), А.В. Емельянов (RU), А.В. Еремин (RU). – Оpubл.10.06.2010. – Бюл. № 16.

70. URL: <http://www.plackart.com/>

71. Патент № 2305065, МПК B82B3/00 (2006.01) Способ получения углеродных и металлоуглеродных наночастиц / Е.В. Гуренцов (RU), А.В. Емельянов (RU), А.В. Еремин (RU). – Оpubл. 27.08.2007. – Бюл. 24.

72. Патент № 2371379, МПК В82В3/00 (2006.01) С23С14/34 (2006.01) Способ нанесения нанопокровтий и устройство для его осуществления / В.П. Виноградов (RU), В.И. Крауз (RU), В.В. Мялтон (RU), В.П. Смирнов (RU), Л.Н. Химченко (RU). – Оpub. 27.10.2009. – Бюл. № 30.

73. Патент № 2280097, МПК С23С14/35 (2006.01). Магнетронное распылительное устройство / О.С. Кузьмин (RU), Л.Г. Косицын (RU), В.Н. Лихачёв (RU). – Оpub. 20.07.2006. – Бюл. №20.

74. Разработка и следование технологии производства антифрикционного износостойкого покрытия для машиностроения с использованием магнетронного напыления хрома и ионной имплантации / Ю.О. Бахвалов, Г.Е. Мишензников, А.С. Анисимова, И.В. Ананин, А.В. Сидоров, А.А. Шмалько, В.П. Сергеев // Композиты и наноструктуры. – 2011. – № 4. – С. 5–13.

75. Ионно-плазменное оборудование для формирования наноструктурированных упорядоченных покрытий в машиностроении и инструментальной промышленности / А.А. Лозован, А.С. Ленковец, Н.Н. Щитов, С.В. Моргунов // Технология машиностроения. – 2012. – № 8. – С. 20–23.

76. Патент №2413037, МПК С23С 26/00, С23С 10/26 (2006.01) Способ формирования на поверхности стальных изделий наноструктурированных слоев особыми / А.Г. Соколов РФ, С.А. Шашерина РФ, В.П. Артемьев. – Заявлено от 06.08.09 г.; опубл. 27.02.2011. – Бюл. № 6.