

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 11 (119)

ноябрь

2014

Издается с января 2005 г.

Главный редактор

д.т.н., проф.

Ю.В. ПАНФИЛОВ

Председатель редакционного совета

д.т.н., проф., заслуженный

деятель науки и техники РФ

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

Заместитель главного**редактора**

д.ф.-м.н., проф.

В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

д.т.н., проф.

В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН

д.т.н., проф.

А.В. КИРИЧЕК

д.т.н., проф.

О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.

А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.

В.П. БАЛКОВ, к.т.н.

В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.

С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.

В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.

С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.

Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.

В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.

В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.

В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.

Е.Д. МАКАРЕНКО

Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.

Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.

Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.

В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.

А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.

Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.

В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.

В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Редакция:

И.Н. МЫМИНА

Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: "Роспечать" 85159, "Пресса России" 39269, "Почта России" 60252) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77.
Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

СОДЕРЖАНИЕ



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Кокорин В.Н., Филимонов В.И., Григорьев А.А., Сизов Н.А., Кокорин А.В.

Теоретические исследования процесса интенсивного уплотнения гетерофазных механических смесей3

Лебедев В.А., Ермолаев Г.В., Лой С.А., Матвиенко М.В. Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на термостойкость8



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Буглаев А.М. Повышение стойкости разделительных штампов с твердосплавными режущими элементами алмазным выглаживанием13



ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Михальченков А.М., Соловьев С.А., Михальченкова М.А. Эффективность импортозамещающих технологий изготовления, восстановления и упрочнения деталей почвообрабатывающих орудий способом компенсирующих термоупрочненных элементов17



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Латушкина С.Д., Куис Д.В., Жижченко А.Г., Посылкина О.И., Рудак П.В., Комаровская В.М. Вакуумно-плазменные защитные покрытия на дереворежущий инструмент23



ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Жачкин С.Ю., Болдырев А.И., Болдырев А.А., Михайлов В.В., Гедзенко Д.В., Пеньков Н.А. Антикоррозионная защита металла методом гальваноконтантного осаждения29

Коренев В.Н. Обоснование микротвердости покрытий при напылении водородно-кислородным пламенем31

Смоленцев В.П., Сафонов С.В., Грицюк В.Г. Проектирование технологического процесса электроискрового легирования и покрытия металлических изделий36



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Леванцевич М.А., Белоцерковский М.А., Кукареко В.А., Белый А.В. Ионно-лучевое азотирование газотермических покрытий с плакированными слоями42

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

В.А. Лебедев (ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев),
Г.В. Ермолаев, С.А. Лой, М.В. Матвиенко (Национальный университет кораблестроения,
г. Николаев, Украина)
E-mail: lebedevvladimir@ucr.net

Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на термостойкость

С использованием компьютерного моделирования и аналитического расчета выполнен анализ напряженного состояния при нагреве-охлаждении плоского образца с напыленным покрытием, имеющим меньший коэффициент линейного термического расширения, чем материал подложки. Установлена зависимость максимальных напряжений в нем от его жесткости и относительной толщины.

Ключевые слова: покрытие, испытания на термостойкость, напряженное состояние.

The method of computer simulation and analytical calculation is execute the analysis of the tense state at heating-cooling of flat standard with a spraying coating, having less coefficient of linear thermal expansion, what material of substrate. Dependence of maximal tensions in coating from his inflexibility and relative thickness is set.

Keywords: coating, tests on heat stability, tense state.

Постановка проблемы

Для повышения работоспособности и долговечности деталей газовых турбин широко используются специальные защитные покрытия [1–5]. Эти покрытия должны обладать достаточными пластичностью и прочностью и не растрескиваться под действием механических и термических нагрузок. На сопротивление покрытия разрушению большое влияние оказывают термические напряжения, возникающие в результате разности коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР) подложки и напыленного слоя, изменения температуры в процессе как изготовления (нанесения покрытия и термообработки), так и работы детали.

Для оценки термостойкости покрытия проводят специальные лабораторные испытания [6], в которых образцы с нанесенным покрытием многократно нагревают и охлаждают в диапазоне температур 100...1200 °С. Критерием термостойкости при этом является состояние покрытия после испытаний, в частности отсутствие трещин и отслоений от подложки. К сожалению, при этом, как правило, не анализируется количественное влияние отдельных параметров, таких, например, как соотношение толщин покрытия и подложки, их жесткостей (модулей упругости), КЛТР, наличие начальных напряжений и т. д. Это затрудняет обобщение результатов многочисленных экспериментов, проводимых на образцах с подложками и покрытиями из различных материалов. Поэтому изучение напряженного состояния при нагреве-охлаждении образцов с покрытиями и влияния на него различных факторов актуально.

Анализ последних публикаций

В публикациях, посвященных напряженному состоянию в газотермических покрытиях [7–12], как правило, рассматривается влияние технологических факторов на величину и характер распределения остаточных напряжений и практически отсутствуют данные об их распределении в образцах при последующем термоциклировании, поэтому данная работа, посвященная изучению напряженного состояния при изменении температуры, актуальна.

Цель работы

Целью работы являются исследование напряженного состояния при нагреве-охлаждении образцов с напыленными покрытиями и установление количественных зависимостей уровня напряжений от толщины покрытия и свойств материалов.

Проведение исследований и их результаты

Исследования выполнялись методом компьютерного моделирования на базе метода конечных элементов (КЭ) с использованием программного комплекса ANSYS. Исследовали образцы типа плоской пластины с нанесенным на верхнюю поверхность покрытием, которые обычно используются при испытаниях на термостойкость. Анализировались поля и эпюры напряжений в упругой стадии работы на образцах с покрытием при повышении температуры на $\Delta T = 100$ °С. Физические и конечно-элементные модели показаны на рис. 1.

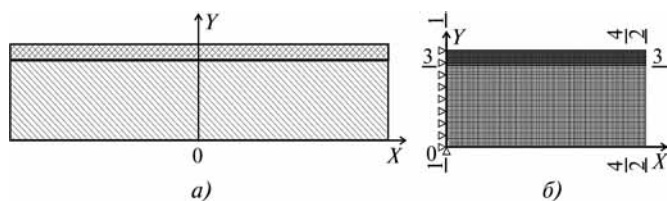


Рис. 1. Физическая (а) и конечно-элементная (б) модели образца с покрытием

Изучались два варианта моделей: с покрытием малой (вариант 1) и большой (вариант 2) жесткости. В обоих вариантах КЛТР материала покрытия принимался меньше, чем у материала подложки. Принятые при моделировании размеры и физико-механические свойства приведены в таблице. Коэффициенты Пуассона для всех материалов подложек и покрытий принимались равными 0,3.

Толщины слоев и свойства материалов

Слой	Толщина a , мм	Модуль упругости E , МПа		КЛТР α , $1/^\circ\text{C}$
		Вариант 1	Вариант 2	
Подложка	1,0 и 2,0	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$12 \cdot 10^{-6}$
Покрытие	От 0,1 до 1,0	$0,5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-6}$

Анализ полей продольных, поперечных и касательных напряжений в сечении узла показал, что их характер практически одинаков в обоих вариантах образцов (рис. 2, см. с. 3 обложки) и при всех соотношениях толщин. На большей части длины образца продольные напряжения сохраняют постоянную величину (рис. 2, а, б) и только вблизи торца, на расстоянии, равном толщине, начинают заметно снижаться. Это соответствует общим принципам механики и говорит о том, что на большей части длины образца в средней его части поперечные сечения остаются плоскими, искривляясь только вблизи торцов. Это подтверждают и поля поперечных и касательных напряжений (рис. 2, в...е). На большей части длины образца они отсутствуют, а появляются и растут только вблизи торцов, достигая максимума на боковой поверхности. При этом максимальные касательные напряжения сосредоточены на поверхности раздела покрытие—подложка.

Для удобства количественного сравнения уровня напряжений и характера их распределения на рис. 3 приведены эпюры продольных напряжений в сечении 1 (по вертикальной оси в средней части), поперечных напряжений в сечении 2 (по торцевой поверхности) и касательных напряжений в сечении 3 (по границе раздела) для образцов с напыленными покрытиями малой (вариант 1) и большой (вариант 2) жесткости.

Анализ полей и эпюр показывает, что максимальные (по модулю) значения продольных и по-

перечных напряжений противоположны по знаку. При нагреве максимальные продольные сжимающие напряжения возникают в материале подложки, а максимальные растягивающие — в напыленном слое на границе раздела (рис. 3, а, б). Поперечные напряжения при этом сосредоточены на торцевых поверхностях (сечение 2). В материале подложки они растягивающие, а в напыленном слое — сжимающие (рис. 3, в, г).

Касательные напряжения сосредоточены на границе раздела слоев (сечение 3) и достигают максимума вблизи наружной торцевой поверхности (рис. 3, д, е).

При смене нагрева охлаждением уровень напряжений сохранится, а знаки изменятся на обратные.

Уровень всех напряжений как в материале подложки, так и в напыленном слое существенно зависит от жесткости (модуля упругости) материала напыленного слоя. Так, максимальные продольные напряжения в подложке возрастают от -25 МПа в варианте 1 ($E_{\text{н.с}} = 0,5 \cdot 10^5$ МПа) до -70 МПа в варианте 2 ($E_{\text{н.с}} = 3,0 \cdot 10^5$ МПа), т. е. почти в 3 раза. В напыленном слое максимум этих напряжений на границе раздела также возрастает от 29 до 100 МПа (рис. 3, а, б), т. е. более чем в 3 раза.

Максимальные поперечные напряжения на торцевой поверхности вблизи границы раздела возрастают соответственно с 70 до 110 МПа в подложке и от -5 до -75 МПа в напыленном слое (рис. 3, в, г).

Максимальные касательные напряжения на границе раздела вблизи внешней торцевой поверхности также увеличиваются с 35 до 65 МПа (рис. 3, д, е).

Таким образом, с увеличением жесткости напыленного слоя в 6 раз (от $0,5 \cdot 10^5$ до $3 \cdot 10^5$ МПа) в наибольшей степени в нем увеличиваются поперечные напряжения (в 15 раз), в меньшей степени — продольные (более чем в 3 раза) и касательные (почти в 2 раза).

Для оценки адекватности результаты компьютерного моделирования напряжений в образцах с покрытием сравнивались с аналитическим решением для двухслойной пластины по методике, изложенной в [13]. Методика основывается на гипотезе плоских сечений и позволяет определить только продольные напряжения в средней части образца.

Аналитический расчет выполнялся для образцов (см. рис. 1, а) с толщиной подложки a_2 , равной 1 и 2 мм, толщина покрытия a_1 при этом изменялась от 0,1 до 1,0 мм. Рассчитывались напряжения в покрытии на уровне верхней его поверхности (точка 1) и на поверхности раздела покрытие—подложка (точка 2).

Напряжения в любой точке при нагреве двухслойного бруса складываются из двух составляющих: напряжения растяжения-сжатия и напряжения изгиба [13].

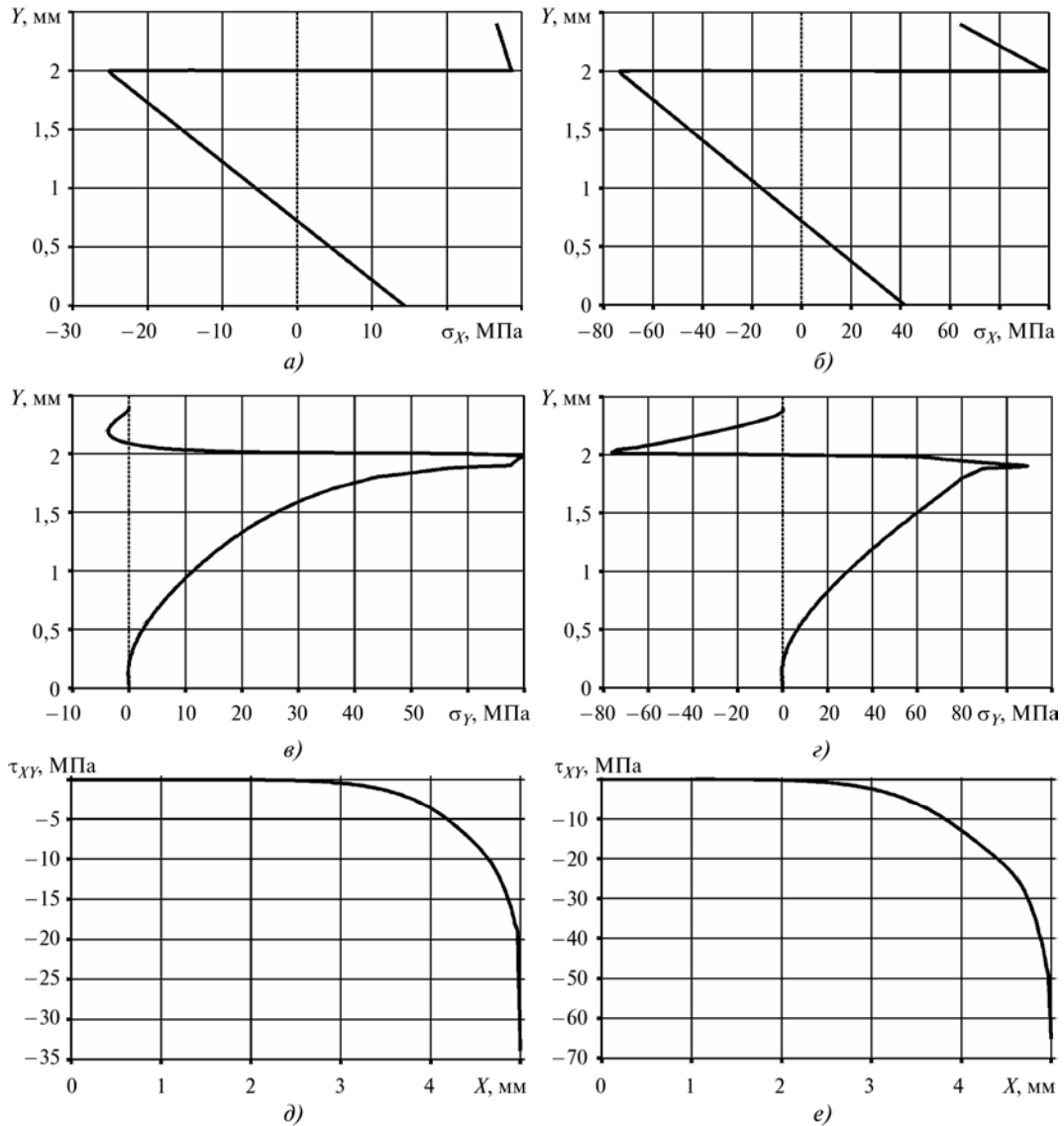


Рис. 3. Эпюры продольных напряжений в сечении 1 (а, б), поперечных в сечении 2 (в, г) и касательных по границе раздела (д, е) в образцах вариантов 1 (а, в, д) и 2 (б, г, е)

В точках 1 и 2 напряжения растяжения

$$\sigma_p = -E_1 \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{1 + \frac{E_1 a_1}{E_2 a_2}}.$$

Вследствие несимметричности бруса эти напряжения создают изгибающий момент

$$M = \sigma_p a_1 (a_1 + a_2) / 2.$$

Напряжения от изгиба в точках 1 и 2:

$$\sigma_1 = \frac{M(z_0 - a_1 - a_2)E_1}{E_0 I_{x0}}; \quad \sigma_2 = \frac{M(z_0 - a_2)E_1}{E_0 I_{x0}},$$

где z_0 — ордината упругого центра масс относительно нижней кромки образца, которая определяется уравнением

$$z_0 = \frac{E_1 a_1 (a_2 + a_1 / 2) + E_2 a_2 / 2}{a_1 E_1 + a_2 E_2};$$

$E_0 I_{x0}$ — упругий момент инерции сечения образца, который определяется по формуле

$$E_0 I_{x0} = E_1 \frac{a_1^3}{12} + E_2 \frac{a_2^3}{12} + E_1 a_1 (z_1 - z_0)^2 + E_2 a_2 (z_2 - z_0)^2.$$

Сравнение результатов аналитических расчетов и компьютерного моделирования показал, что уровень продольных напряжений в любой точке при

одних и тех же жесткостях материалов подложки и напыленного слоя зависит только от соотношения толщин слоев, оставаясь неизменным при пропорциональном изменении толщин. Результаты расчетов и моделирования продольных напряжений полностью совпали (рис. 4). Анализ кривых показывает, что наибольших значений растягивающие продольные напряжения в напыленном слое при нагреве достигают на поверхности раздела с основным металлом, при этом различие напряжений по толщине слоя с уменьшением его относительной толщины заметно уменьшается и при отношении толщин менее 0,1 они становятся практически одинаковыми. При увеличении относительной толщины наплавленного слоя растягивающие продольные напряжения на внешней поверхности напыленного слоя заметно снижаются, достигая нуля и переходя в сжимающие при отношении толщин a_1/a_2 , равном 0,9 и 0,4 в слоях с малой и большой жесткостью соответственно.

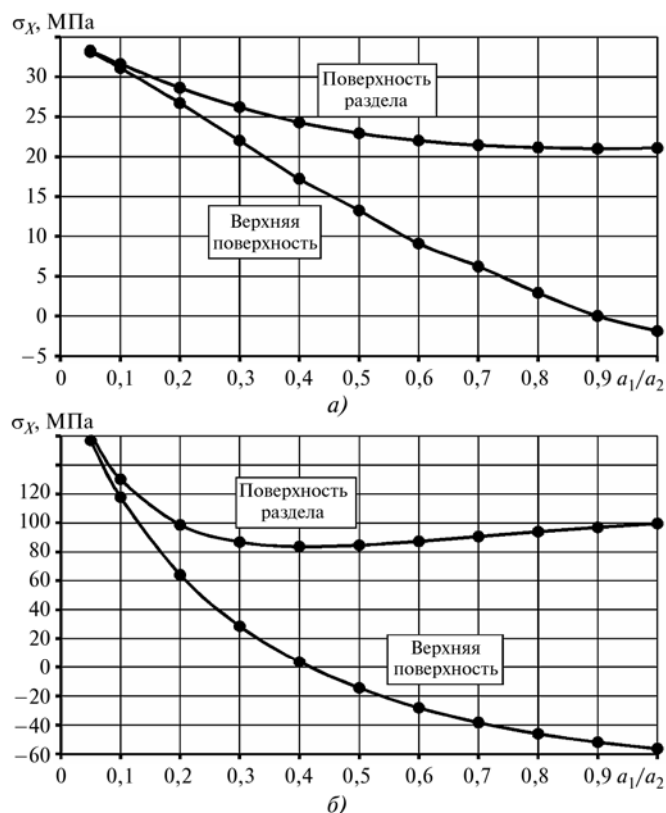


Рис. 4. Зависимость продольных напряжений от отношения толщин слоев a_1/a_2 в покрытии малой (а) и большой (б) жесткости при нагреве на 100 °С

Некоторое уменьшение растягивающих продольных напряжений на поверхности раздела с увеличением относительной толщины напыленного слоя наблюдается только при ее значениях до 0,3...0,5. Затем напряжения стабилизируются, а в

слое с большой жесткостью снова несколько увеличиваются.

Таким образом, наиболее вероятной областью зарождения трещины в напыленном слое при нагреве является поверхность раздела. При этом лучшим с точки зрения уменьшения растягивающих продольных напряжений в напыленном покрытии и повышения его термостойкости является отношение толщин a_1/a_2 более 0,5 в слоях малой жесткости и более 0,2 (в диапазоне 0,3...0,7) в слоях большой жесткости.

Компьютерное моделирование при полном совпадении с результатами аналитического расчета продольных напряжений вместе с тем позволяет в отличие от последнего определить поперечные и касательные напряжения на участках искривления сечений. Именно на этих участках, как показали результаты моделирования, создаются благоприятные условия для образования трещин в хрупком материале напыленного слоя, так как растягивающие поперечные напряжения на стадии снижения температуры соизмеримы с продольными в средней части образца на стадии нагрева.

Кроме того, большие касательные напряжения на границе раздела на этих участках создают опасность отслоения напыленного слоя.

Выводы

1. Методами аналитического расчета и компьютерного моделирования установлены количественные зависимости для напряжений при нагреве и охлаждении образцов с напыленным покрытием.
2. Уровень и характер распределения продольных напряжений на большей части образца с напыленным покрытием могут быть определены аналитическим расчетом, поперечные и касательные напряжения — только компьютерным моделированием.
3. При термоциклировании образцов с напыленным покрытием в последнем возникают растягивающие напряжения, создающие условия для хрупкого разрушения как на стадии нагрева (продольные в средней части образца), так и на стадии охлаждения (поперечные на торцевых поверхностях). Вблизи торцов на границе раздела возникают касательные напряжения, создающие условия для отслоения покрытия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гецов Л.Б. Детали газовых турбин. Л.: Машиностроение, 1982. 296 с.
2. Коломышев П.Т. Газовая коррозия и прочность никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1984. 215 с.

3. Мовчан Б.А., Малащенко Н.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. Киев: Наук. думка, 1983. 231 с.

4. Лой С.А., Дубовой А.Н. Плазменное напыление защитных покрытий на детали горячего тракта судовых турбин // Збірник наукових праць УДМТУ. Миколаїв. УДМТУ. 1999. № 6 (366). С. 105–109.

5. Лой С.А., Дубовой А.Н. Повышение эффективности плазменного напыления защитных покрытий // Збірник наукових праць УДМТУ. Миколаїв. УДМТУ. 1999. № 2 (362). С. 68–75.

6. Термостойкость азотированной стали H26Ю3ТБ / А.В. Бильченко, В.Г. Горбач, А.И. Дудка, А.В. Любомский // Вісник СевНТУ: Зб. наук. пр. Вип. 120/2011. Серія: Механіка, енергетика, екологія. Севастополь; СевНТУ, 2011. С. 131–136.

7. Хаскин В.Ю. Комбинированное лазерно-микроплазменное нанесение керамических покрытий на стали // Доповіді Національної академії наук України. 2007. № 8. С. 99–102.

8. Лузан С.А., Кальянов В.Н. Исследование остаточных напряжений в напыленных покрытиях // Сварочное производство. 1986. № 1. С. 2–4.

9. Долгов Н.А. Метод определения модуля упругости газотермических покрытий // Порошковая металлургия. 2004. № 7/8. С. 110–115.

10. Похмурский В.И., Студент М.М., Довгунук В.М. и др. Возникновение и перераспределение внутренних напряжений в электродуговых покрытиях во время их формирования // Автоматическая сварка. 2006. № 10. С. 15–19.

11. Кулик А.Я., Шаронов Е.А., Мезерницкий А.Ю. Остаточные напряжения в оксидных плазменных покрытиях // Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Рига: Зинатне, 1980. Т. 2. С. 12–16.

12. Куприянов И.Л., Геллер М.А., Горелик Г.Е., Мазовко А.В. Теплообмен и термические напряжения при нанесении газотермических покрытий на полужоку // Физика и химия обработки материалов. 1988. № 3. С. 27–31.

13. Ермолаев Г.В., Кручинин В.Н. Напряжения и деформации в паяных соединениях. Технология судостроения и сварочного производства. Сб. науч. трудов. Николаев, НКИ, 1983. С. 48–57.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Ю.И. Головин

2012 г. Объем 656 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-662-8 Цена 800 р.



Изложены физико-химические основы нанотехнологии. Особенное внимание уделено размерным эффектам различной природы и путям их практического использования в различных наноструктурах и изделиях. Рассмотрены современные методы получения, исследования и определение свойств наноматериалов. Систематизированы и описаны основные направления развития нанотехнологий и нанотехники: физическое наноматериаловедение и наномеханика, наноэлектроника и нанобиотехнологии.

Наряду с общими положениями приведено большое число примеров конкретных разработок, доведенных до промышленного производства. Автор использовал как литературные, так и собственные данные. Книга содержит обширный ссылочный аппарат, включающий зарубежные и отечественные источники.

Для инженерно-технических работников, осваивающих и использующих нанотехнологические процессы, а также может быть полезна студентам и аспирантам, специализирующимся в этой области.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU