

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный технический университет»

Кафедра «Физика»

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ

**Материалы
VII Региональной научно-практической конференции
с международным участием
(Омск, 20 апреля 2018 года)**

*Научное текстовое электронное издание
локального распространения*

Омск
Издательство ОмГТУ
2018

УДК 001
ББК 72
А43

Редакционная коллегия:

А. И. Блесман, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. физики ОмГТУ;

М. А. Зверев, канд. техн. наук, доцент каф. физики ОмГТУ;

О. М. Сухарева, ст. преподаватель каф. физики ОмГТУ

Актуальные проблемы современной науки : материалы VII Регион.
А43 науч.-практ. конф. с междунар. участием (Омск, 20 апр. 2018 г.) /
Минобрнауки России, ОмГТУ, каф. «Физика» ; [редкол.: А. И. Блесман,
М. А. Зверев, О. М. Сухарева]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2018.

ISBN 978-5-8149-2646-3

Рассмотрены вопросы, касающиеся следующих направлений: материаловедения, нанотехнологий, физики, образования.

Издание адресовано научным сотрудникам, аспирантам и студентам, а также всем, кого интересуют проблемы современной науки.

УДК 001
ББК 72

1 электронный оптический диск

Оригинал-макет издания выполнен в Microsoft Office Word 2007/2010 с использованием возможностей Adobe Acrobat Reader.

Минимальные системные требования:

- процессор Intel Pentium 1,3 ГГц и выше;
- оперативная память 256 Мб и более;
- свободное место на жестком диске 260 Мб и более;
- операционная система Microsoft Windows XP/Vista/7/10;
- разрешение экрана 1024×768 и выше;
- акустическая система не требуется;
- дополнительные программные средства Adobe Acrobat Reader 5.0 и выше.

Ответственность за содержание материалов несут авторы

Издается в авторской редакции

Подписано к использованию 08.06.18.

Объем 4,72 Мб.

Издательство ОмГТУ.

644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12

Эл. почта: info@omgtu.ru

Секция 1
Материаловедение и нанотехнологии

УДК 621.9.048

Б.Ш. Алимбаева, М.Ю. Байбарацкая, Д.А. Кокотько, Д.А. Пестряков

Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва
(Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия

**ПОВЕРХНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСИСТЕМ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ**

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы по применению высококонцентрированных потоков энергии для поверхностного упрочнения стальных деталей узлов трения машин. Показано значительное снижение до 2 раз скорости изнашивания полимерных контробразцов при трении по стальным образцам, модифицированным электроискровой обработкой на различных технологических режимах. С использованием метода «крутого восхождения» определены оптимальные режимы электроискровой обработки.

Ключевые слова: упрочнение, поверхностный слой, электроискровая обработка, легирующий электрод, износостойкость, скорость изнашивания, оптимизация.

Введение. Важной задачей машиностроения является обеспечение долговечности деталей машин, которая в основном определяется применяемой технологией поверхностного упрочнения или нанесения покрытий. Широкое применение в производстве и ремонте находят упрочняющие технологии с применением высококонцентрированных потоков энергии и вещества, позволяющие улучшить эксплуатационные свойства стальных деталей, к которым относится электроискровая обработка (ЭИО) [1-5]. При этом формирование упрочненных поверхностных слоев во многом зависит от выбора электродного материала.

Процесс образования концентрированного потока электронов при электрическом разряде и его взаимодействия со стальной основой можно представить в виде структурной схемы термодинамических процессов в системе «легирующий электрод (анод) – обрабатываемая деталь (катод)» (рис. 1) [6, 7].

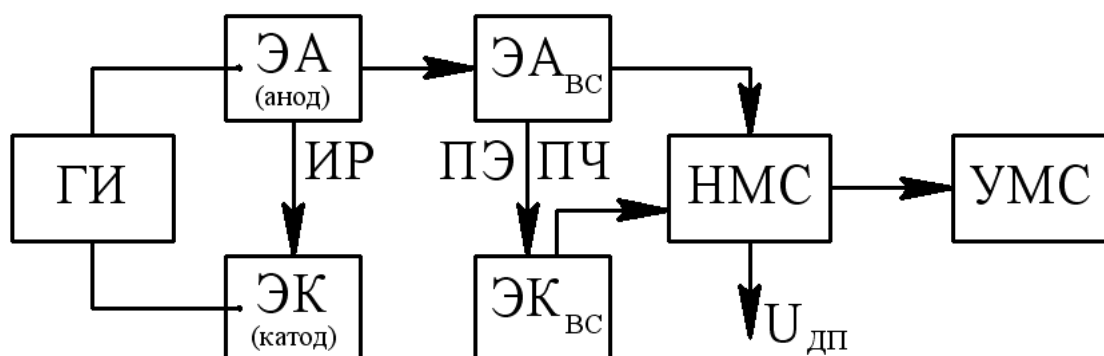


Рис. 1. Структурная схема термодинамических процессов при ЭИО: ГИ – генератор импульсов; ИР – искровой разряд; ПЭ – поток электронов; ПЧ – поток частиц; ЭА_{вс}/ЭК_{вс} – анод/катод в возбужденном состоянии; НМС – неустойчивая модифицированная структура; УМС – устойчивая модифицированная структура

При сближении легирующего электрода (ЛЭ) с поверхностью обрабатываемой детали напряженность электрического поля возрастает, между ними возникает искровой электрический разряд (ИР). Поток электронов (ПЭ) устремляется к поверхности катода. Кинетическая энергия заторможенных электронов аккумулируется в поверхностных слоях анода, переводя его в возбужденное состояние ($\text{ЭА}_{\text{ВС}}$), при котором металл анода плавится, из него выделяется поток мелких частиц (ПЧ), направляющийся к поверхности катода. Частицы нагреваются, закипают и, попадая на поверхность катода, образуют сильные адгезионные связи и частично диффундируют на незначительную глубину, формируя неустойчивую модифицированную структуру (НМС). В таком режиме работы системы «анод – катод» на поверхности катода вследствие диссипативных процессов формируется слой покрытия устойчивой модифицированной структуры (УМС).

Целью настоящей работы является исследование влияния энергетических режимов электроискровой обработки и состава применяемых электродных материалов на триботехнические свойства покрытий, формируемых ЭИО на поверхности стальных деталей.

Оборудование и методика эксперимента. Объектом исследования является конструкционная легированная сталь 15ХГН2ТА, широко применяемая для изготовления деталей узлов трения машин. Обработка осуществлялась на установке для ЭИЛ модели ИМЭИ-1001-IMES, обеспечивающей технологические режимы: напряжение $U = 40\text{--}160\text{ В}$; емкость конденсаторов $C = 34\text{--}240\text{ мкФ}$ (рис. 2).

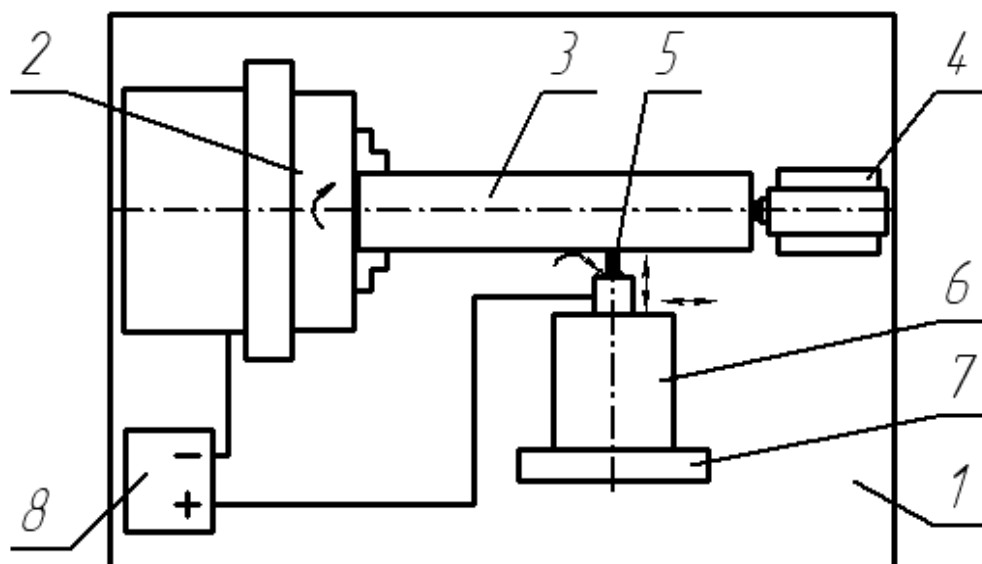


Рис. 2. Схема установки для механизированной ЭИО: 1 – база токарного станка; 2 – изолированный кулачковый патрон; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – изолированная задняя бабка; 5 – легирующий электрод; 6 – механизированная головка с суппортом станка; 7 – следящая система; 8 – генератор импульсов

Обработке подвергались образцы с параметром шероховатости $Ra \leq 0,8$ из конструкционной легированной стали 15ХГН2ТА, широко применяемой в машиностроении. Поверхности стальных деталей подвергались электроискровой обработке различными по составу легирующими электродами: электрод марки Т15К6 (TiC–15%, Co–6%, WC–79%); электрод ИМХ2 (WC–Co–50%, Ni–Cr–B–Si–50%); электрод Ш2 с минеральным сырьем Дальневосточного региона на основе шеелитового концентрата (TiC–60%, Ni–Cr–Al–30%, ШЛК (шеелитовый концентрат CaWO_4)–10%). Состав электродов ИМХ2 и Ш2 разработан в Институте материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН под руководством Николенко С.В. [8].

Исследование триботехнических свойств модифицированной стали производили на специальной установке, созданной на базе настольного сверлильного станка, по схеме трения «палец-диск» при контактном давлении $P = 2,66$ МПа и скорости скольжения $V = 1,20$ м/с. В качестве контробразцов были использованы цилиндрические пальцы из композиционного материала на основе политетрафторэтилена. С целью оптимизации режимов ЭИО был разработан и реализован план факторного эксперимента типа $N = 2^3 = 8$. В качестве параметра оптимизации была принята скорость изнашивания покрытия (J). В качестве независимых факторов воздействия были выбраны: X_1 – напряжение, X_2 – разрядная емкость, X_3 – продолжительность ЭИО.

Исследование покрытий, сформированных электродом ИМХ2 после триботехнических испытаний, проводилось на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-5700 с помощью специального модуля – рентгеновского энергодисперсионного спектрометра с использованием отраженных электронов.

Результаты исследований и их обсуждение. Триботехнические свойства покрытий, формируемых на стальной основе ЭИО, оценивали по скорости изнашивания полимерных контробразцов при трении скольжения по поверхности стальных образцов, модифицированных электродом ИМХ2, который был выбран по результатам предварительных исследований [6, 7]. Оценку скорости изнашивания производили по величине массового износа полимерных контробразцов.

Триботехнические испытания показали, что при увеличении энергии импульса при электроискровой обработке стальных образцов скорость изнашивания полимерного контробразца снижается в 1,2-1,3 раза. Увеличение продолжительности обработки стали оказывает незначительное влияние на скорость изнашивания полимерных контробразцов (на ~3%). Также установлено, что скорость изнашивания металлополимерной пары трения с образцами, модифицированными электродом ИМХ2, меньше, чем этот параметр у пары трения с закаленным образцом, приблизительно в 1,6-2 раза.

На рисунке 3 показано изображение поверхностей после триботехнических испытаний, полученных методом растровой электронной микроскопии. Как видно из рисунка, участки поверхности образцов на дорожке трения заметно отличаются от участков поверхности вне дорожки. На участке дорожки трения хорошо видна полимерная пленка фрикционного переноса, структурированная в направлении скольжения. На участке рядом с дорожкой трения присутствует островковое покрытие без пленки фрикционного переноса.

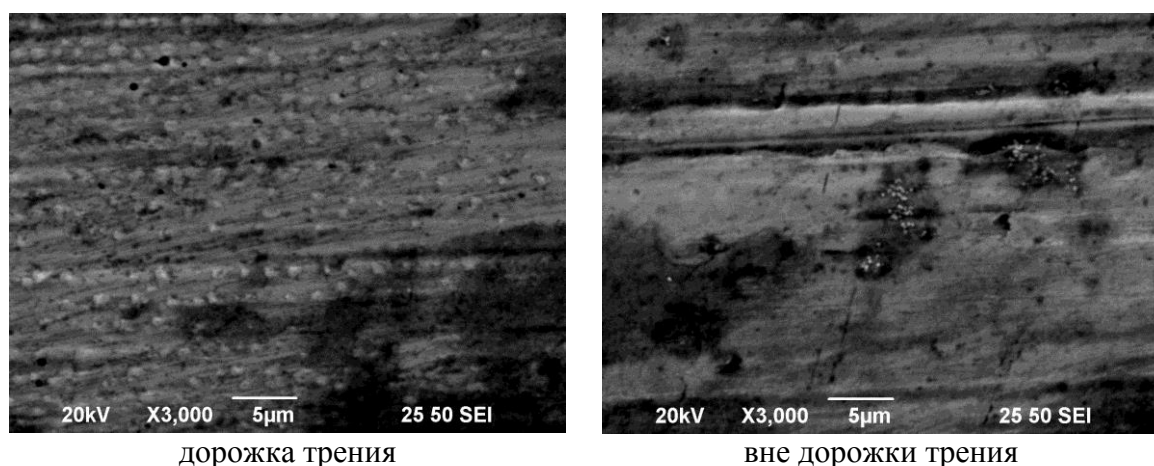


Рис. 3. Поверхность образца из стали 15ХГН2ТА, обработанного электродом ИМХ2 ($U = 120$ В; $C = 150$ мкФ; $t = 4$ мин/см²), после триботехнических испытаний

С целью оптимизации технологических режимов электроискрового модифицирования был разработан и реализован план факторного эксперимента $N = 2^3 = 8$. Граничные значения выбирались, исходя из результатов предварительных экспериментов [6, 7].

По результатам расчета средних экспериментальных значений скорости изнашивания (J) и коэффициентов регрессии получено уравнение регрессии:

$$Y = 6,91 - 0,41X_1 - 0,44X_2 - 0,16X_1X_2$$

Анализ полученного уравнения позволяет сделать вывод о влиянии режимов ЭИО на скорость изнашивания. Увеличение анодно-катодного напряжения X_1 и разрядной емкости X_2 приводит к снижению скорости изнашивания. Совместное влияние напряжения и емкости конденсаторов также уменьшает скорость изнашивания. Следовательно, для уменьшения скорости изнашивания необходимо увеличивать разрядную емкость конденсаторов и анодно-катодное напряжение.

Наибольшее влияние на скорость изнашивания оказывает разрядная емкость конденсаторов X_2 установки ЭИЛ. Влияние анодно-катодного напряжения X_1 незначительно меньше X_2 , а продолжительность обработки X_3 практически не влияет на скорость изнашивания, т.к. коэффициент b_3 оказался незначимым, что коррелирует с экспериментальными зависимостями влияния энергии импульса на скорость изнашивания при различной продолжительности ЭИО стальных образцов.

Оптимизационное исследование методом «крутого восхождения» позволило установить, что для обеспечения значительного снижения скорости изнашивания полимерного контробразца в металлополимерной паре трения с модифицированным стальным образцом необходимо установить следующие технологические режимы обработки: напряжение $U \approx 145-150$ В, емкость конденсаторов $C \approx 225-230$ мкФ, продолжительность обработки $t = 4-5$ мин/см².

Заключение. Таким образом, установлено, что электроискровая обработка стальных поверхностей приводит к значительному в 1,6-2,0 раза снижению скорости изнашивания сопряженных полимерных контробразцов из ПКМ на основе ПТФЭ при трении их по модифицированному стальному образцу; наибольшее снижение скорости изнашивания достигается при напряжении $U = 145-150$ В, емкости конденсаторов $C = 225-230$ мкФ.

Библиографический список

1. Белый А. В., Кукаренко В. А., Чой К. И. Структура и свойства обработанной концентрированными потоками ионов азота инструментальной мартенситно-стареющей стали типа Fe-Co-W // *Материаловедение*. 2011. № 12. С. 11–15.
2. Батаева Е. А., Батаев И. А., Буров В. Г. [и др.]. Влияние исходного состояния на неоднородность структуры углеродистых сталей, упрочненных методом электронно-лучевой обработки при атмосферном давлении // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2009. №3(645). С. 3–6.
3. Бондарь А. В., Смоленцев Е. В. Криогенно-эрозионное упрочнение металлических изделий // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2006. № 4. С. 24–28.
4. Машков Ю. К., Полещенко К. Н., Порозовнюк С. Н. [и др.]. Трение и модифицирование материалов трибосистем. М.: Наука, 2000. 280 с.
5. Коротаев Д. Н., Эдигаров В. Р., Алимбаева Б. Ш. Поверхностное электроискровое модифицирование в технологиях изготовления и ремонта деталей военной техники: моногр. Омск: ОАБИИ, 2014. 196 с.
6. Машков Ю. К., Коротаев Д. Н., Байбарацкая М. Ю. [и др.]. Исследование наноструктурных покрытий, синтезируемых методом электроискровой обработки // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85, № 10. С. 75–79.

7. Машков Ю. К., Коротаев Д. Н., Алимбаева Б.Ш. [и др.]. Влияние электроискровой обработки на структуру и свойства модифицированных поверхностей трения // Трение и износ. 2016. Т. 37, № 1. С. 83–88.

8. Николенко С. В., Хосен Ри. Электродные материалы для электроискрового легирования с минеральными и самофлюсующимися добавками: моногр. Хабаровск: Тихоокеан. гос. ун-т, 2015. 206 с.

УДК 621.762

В.А. Безрукова, А.В. Туезов, Е.Е. Корниенко

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧИСТОТЫ ПОРОШКА B_4C НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ, СПЕЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

Аннотация. Работа посвящается исследованию влияния примеси железа на структуру и свойства образцов, полученных с использованием технологии искрового плазменного спекания (SPS) при различных температурах: 1800, 1900 и 2000 °С. Растровой электронной микроскопией показано, что все образцы обладают схожей микроструктурой, характеризующейся наличием трех различных областей. ДюрOMETрическими исследованиями установлено, что микротвердость всех образцов соответствует значениям микротвердости, представленным в литературе. Также показано, что прочность на сжатие в два и более раза ниже теоретической. Сделан вывод о том, что даже небольшое содержание примеси железа способствует значительному снижению механических свойств образцов.

Ключевые слова: карбид бора, B_4C , искровое плазменное спекание, растровая электронная микроскопия, микротвердость, механические свойства.

Введение. Керамика является одним из наиболее перспективных материалов в машиностроении и материаловедении в целом. Керамические материалы известны своими уникальными свойствами. Так, карбид бора (B_4C) отличается высокой твердостью и низкой плотностью, а также высокой температурой плавления [1-3]. Основной технологией получения изделий из карбида бора является горячее прессование [1]. Стоит отметить, что в последние годы встречается все больше исследований, посвященных искровому плазменному спеканию карбида бора [1-3]. Преимуществом данной технологии является быстрота процесса, что, в свою очередь, ограничивает рост зерен [1, 2].

Отмечается, что при формировании изделий из карбида бора его свойства ниже теоретических значений для этого материала, что связано с ростом зерен и пористостью получаемых образцов. Основной вклад в снижение свойств вносит наличие в нем различных примесей [2, 3]. Типичными примесями в коммерческих порошках B_4C являются: оксид бора (B_2O_3), свободный углерод, а также железо и алюминий [3]. Оксид бора формируется в процессе получения порошка и представляет собой тонкую пленку на поверхности частиц B_4C , которая не позволяет достичь максимальных значений плотности при спекании. В процессе спекания B_2O_3 реагирует со свободным углеродом. Испарение образующихся газов способствует увеличению пористости образцов. Влияние примесей при SPS на структуру и свойства спекаемых образцов изучено недостаточно.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование влияния Fe в порошке карбида бора на структуру и свойства образцов, спеченных по технологии SPS.

Материалы и методы исследования. В качестве спекаемого материала использовали коммерческий порошок карбида бора со средним размером частиц (50 %) 6 мкм. Соотношение В:С было 3,6:1. Изображение частиц порошка, а также результаты рентгенофазового анализа показаны на рис. 1. Содержание примесей в порошке согласно сертификату производителя представлено в таблице 1.

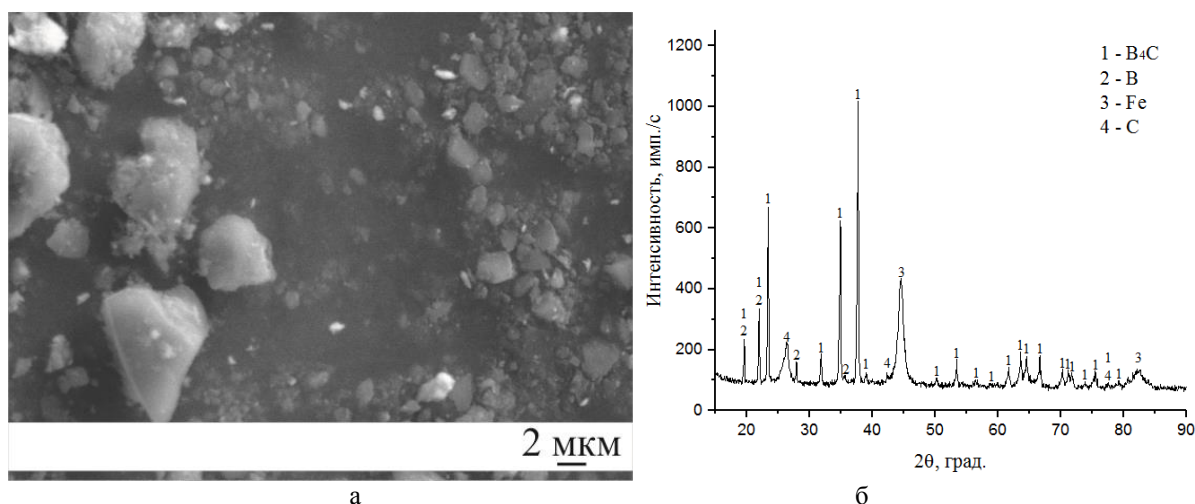


Рис. 1. Изображение частиц порошка В₄С (а) и результаты рентгенофазового анализа (б)

Таблица 1

Содержание примесей в порошке карбида бора

Наименование примеси	Содержание, вес. %
Свободный борный ангидрид	0,18
Свободный бор	0,59
Свободный углерод	0,19
Железо	0,25

При помощи технологии искрового плазменного спекания из исходного порошка получали цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 10 мм. Спекание проводили в Томском политехническом университете на установке SPS 10-4. Порошок спекали при температурах 1800, 1900, и 2000 °С. Давление при спекании было 60 МПа, время выдержки – 5 мин., скорость нагрева – 100 °С/мин.

Исследования структуры образцов проводились на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50 XVP на микрошлифах, приготовленных по стандартной методике. Химический состав частиц порошка и спеченных образцов определяли с использованием микроанализатора EDS X-Act. Фазовый состав порошка и образцов был изучен с использованием рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA в CuKα-излучении. Измерение микротвердости образцов проводили с использованием микротвердомера Wolpert Group 402MVD с нагрузкой 100 г. Испытания на сжатие проводили с использованием испытательной машины Instron 3369, скорость нагружения – 1 мм/мин. Для проведения испытаний на сжатие использовали кубические образцы с длиной стороны 5,1 мм.

Результаты и обсуждения. На рис. 2 представлены изображения структуры спеченных образцов, полученные при помощи растровой электронной микроскопии, а в таблице 2 приведены результаты локального химического анализа. Согласно полученным данным можно заключить, что для всех образцов характерно наличие трех различных участков: сплошные темно-серые области, обогащенные бором (1 на рис. 2); светлые

области, обогащенные Fe (2 на рис. 2); и пористые участки (3 на рис. 2), расположенные по границам частиц. Стоит отметить, что для образцов, спеченных при 2000 °С, характерно наличие микротрещин (рис. 2 (в)). Для оценки фазового состава был проведен рентгенофазовый анализ образцов, результаты которого представлены на рис. 3. Основными фазами спеченных образцов являются карбид бора (B_4C), борид железа (FeB), а также графит (C). Согласно полученным данным, можно сделать следующий вывод: области 1 на рис. 2, обогащенные бором, представляют собой карбид бора (B_4C); включения 2 на рис. 2, обогащенные Fe, – FeB . Наличие углерода можно объяснить тем, что спекание образцов проводили в графитовой пресс-форме, таким образом, поверхность образцов могла быть обогащена им.

ДюрOMETрические исследования (таблица 3) показали, что микротвердость спеченных образцов входит в диапазон значений, представленных в литературных источниках. В то же время прочность на сжатие полученных образцов в несколько раз ниже теоретической (таблица 4). Наиболее высокие значения микротвердости и предела прочности на сжатие характерны для образцов, спеченных при 2000 °С.

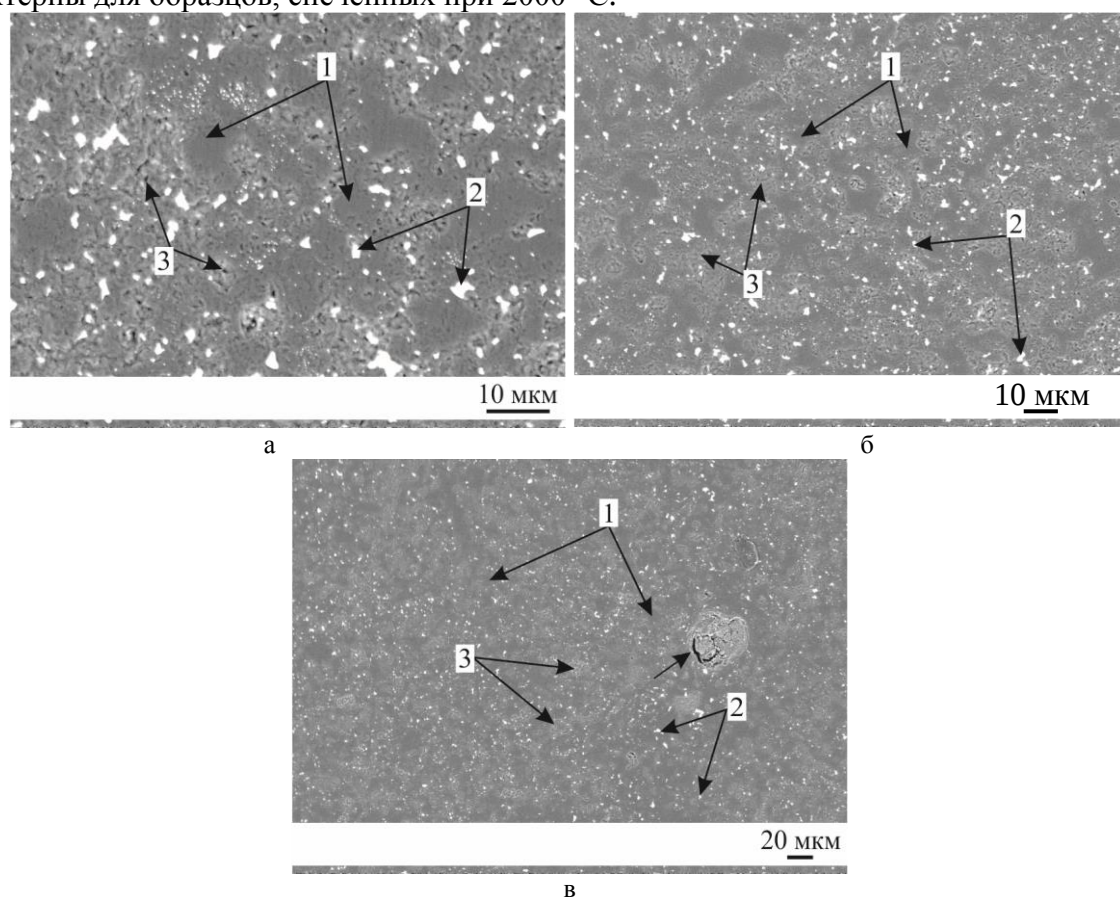


Рис. 2. Микроструктура образцов, спеченных при различных температурах: а – 1800 °С; б – 1900 °С; в – 2000 °С. 1 – B_4C ; 2 – FeB ; 3 – пористые участки

Таблица 2
Результаты локального химического анализа

Номер участка	Химический элемент, вес. %				
	B	C	Fe	Cr	O
1	100	-	-	-	-
2	-	-	98,49	1,51	-
3	-	17,5	-	1,33	81,17

Таблица 3
Результаты дюрометрических исследований

Образец	Микротвердость, ГПа
1800 °С	23,1±5,6
1900 °С	25±5,4
2000 °С	39,3±10,8
Теор.	35±13,4 [4]

Таблица 4
Результаты испытаний на сжатие

Образец	Предел прочности на сжатие, МПа
1800 °С	248±65
1900 °С	216±51
2000 °С	903±94
Теор.	2150±350 [4]

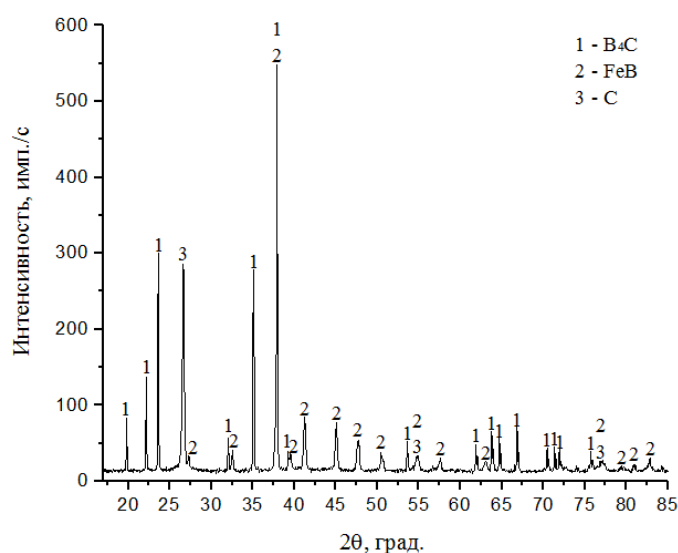


Рис. 3. Дифрактограмма образца, спеченного при 2000 °С

Выводы:

1. Растровой электронной микроскопией и рентгенофазовым анализом показано, что структура спеченных при различных температурах образцов одинакова и представляет собой три области: темные плотные участки, B_4C ; светлые вкрапления – борид железа FeB и пористые участки, расположенные по границам спеченных частиц.
2. С увеличением температуры спекания объемная доля пористых участков уменьшается, что, в свою очередь, ведет к повышению микротвердости. Наибольшей микротвердостью и пределом прочности на сжатие обладают образцы, спеченные при 2000 °С – 39,3±10,8 ГПа и 903±94 МПа, соответственно.
3. Таким образом, даже незначительное содержание железа в исходном порошке приводит к значительному снижению механических свойств.

Библиографический список

1. Xiaorong Zhang, Zhixiao Zhang, Ruolin Wen [et al.]. Comparisons of the densification, microstructure and mechanical properties of boron carbide sintered by hot pressing and spark plasma sintering // *Ceramics International*. 2017. Vol. 44. Doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.10.230.

2. Angel L. Ortiz, Florentino Sánchez-Bajo, Victor M. Candelario, Fernando Guiberteau. Comminution of B₄C powders with a high-energy mill operated in air in dry or wet conditions and its effect on their spark plasma sinterability // Journal of the European Ceramic Society. 2017. Vol. 13. P. 3873-3884. Doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2017.05.034.

3. Mohammad Asadikiyaa, Cheng Zhanga, Christopher Rudolf [et al.]. The effect of sintering parameters on spark plasma sintering of B₄C // Ceramics International. 2017. Vol. 43. P. 11182-11188. Doi: 10.1016/j.ceramint.2017.05.167.

УДК 544.22 : 665.656 : 542.973

Я.И. Бондаренко¹, Е.А. Белопухов^{1,2}, В.Ю. Трегубенко^{1,2}

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

²Институт проблем переработки углеводородов СО РАН, г. Омск, Россия

МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ НОСИТЕЛЕЙ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Аннотация. В работе рассмотрено положительное влияние на прочность носителей введения в их состав отсева сушеного при 120 °С носителя, а также возможность вовлечения в процесс их приготовления помола отсева прокаленного носителя в количествах 1-2%, что незначительно влияет на снижение механической прочности, а также не сказывается на целевых показателях работы катализатора.

Ключевые слова: прочность, катализаторы, оксид алюминия.

В настоящее время физико-химическая теория прочности дисперсных материалов носит больше качественный, чем количественный характер, и на промышленном катализаторном производстве при расчете механической прочности опираются на эмпирические, а не на теоретические данные [1-3]. Ввиду отсутствия общих правил теоретического расчета механической прочности композиционных тонкодисперсных материалов, малоисследованности прочностных характеристик каталитических систем, высокой промышленной значимости данного вопроса, а также увеличения темпов внедрения в нефтепереработке технологий вторичных процессов, в которых применяются алюмооксидные катализаторы, исследования в данной области, несомненно, являются актуальными и своевременными [4].

При промышленном производстве алюмооксидных носителей катализаторов образуется до 6 % отходов в виде крошки и пыли. Для снижения отходов производства применяют введение помола отсева сушеного носителя в замесы с порошком гидроксида алюминия (третья часть отходов). Остается не исследованной возможность добавления к замесам порошка отсева уже прокаленного носителя (до 2 % от общего производства). Прочностные, физико-химические и каталитические свойства таких композиционных носителей и катализаторов исследованы очень мало, поэтому данная работа представляется актуальной как в плане фундаментальных знаний, так и с точки зрения снижения потерь при производстве промышленных катализаторов.

Для приготовления композитных носителей использовали гидроксид алюминия псевдобемитной формы компании Sasol Germany GmbH. Пластификацию смеси проводили раствором органических кислот и формовали в экструдере.

Синтезированный носитель сушили при 120 °С, и часть его мололи, отбирая фракцию помола < 0.05 мм. Данный помол использовали при синтезе первой партии композитных

носителей. Другую часть синтезированного носителя прокаливали при 620 °С, мололи и использовали в приготовлении второй партии носителей. Содержание помола в составе композитных носителей варьировали от 0 до 100 %. Полученные таким образом носители прокаливали при 620 °С. Катализаторы риформинга представляли собой систему 0,25 % мас. Pt и 0,3 % мас. Re, нанесенных на γ -Al₂O₃. Исследуемые носители и катализаторы по своему составу и условиям приготовления приближены к традиционным промышленным.

Для полученных носителей были определены фазовый состав, текстурные характеристики, механическая прочность на раздавливание, также был проведен тест гранул на растрескивание.

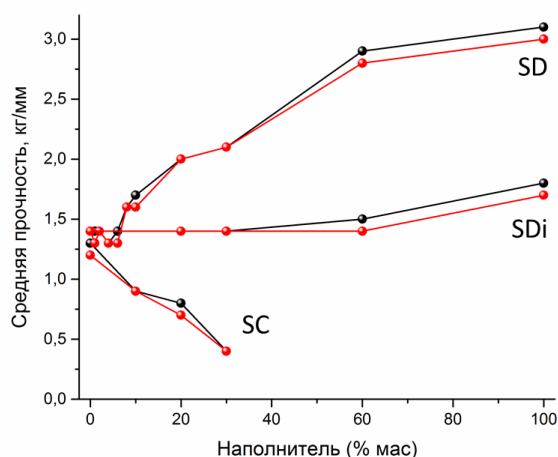


Рис. 1. Зависимость средней прочности носителей катализаторов от содержания отсева носителя. Красные линии – среднее полной выборки, черные линии – среднее усеченной выборки

На рисунке 1 приведены значения прочности носителей катализаторов в зависимости от содержания отсева: SD – образцы с добавлением отсева сушеного носителя, представляющего собой гидроксид алюминия; SDi – образцы с добавлением отсева сушеного носителя и расчетных количеств кислот-модификаторов; SC – образцы с добавлением отсева прокаленного носителя, представляющего собой гамма-оксид алюминия.

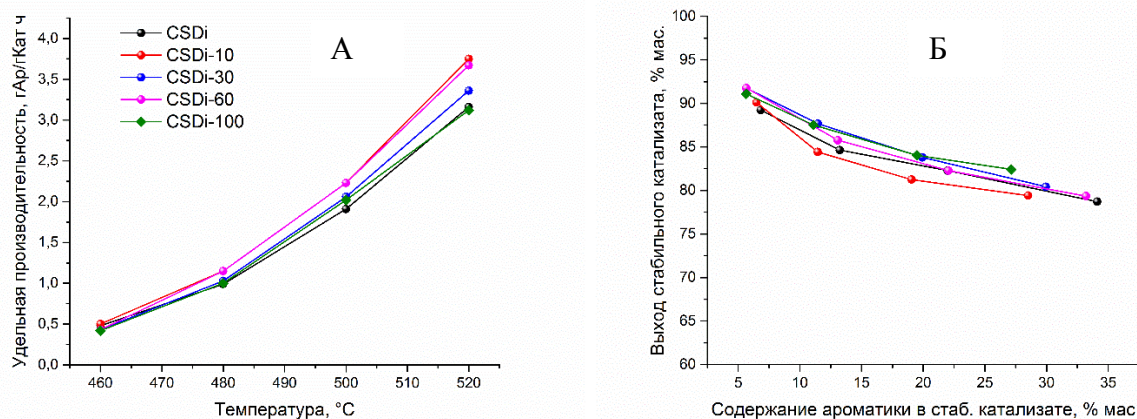


Рис. 2. А. – Температурная зависимость удельной производительности катализаторов (критерий активности). Б. – Выход стабильного катализата в зависимости от содержания в нем ароматических углеводородов (критерий селективности). Черная линия – традиционный катализатор риформинга, цветные линии – катализаторы, приготовленные с отсевом носителя

Приготовленные катализаторы были испытаны в модельной реакции дегидроциклизации н-гептана. Результаты испытаний представлены на рисунке 2. Значения активности, селективности приготовленных образцов близки с каталитическими характеристиками традиционного используемого в промышленности катализатора риформинга.

Из рисунка 2 видно, что процентное содержание в катализаторе отсева сушеного при 120 °С носителя может быть увеличено вплоть до 100 % без отрицательного влияния на целевые показатели работы катализатора (на примере реакции дегидроциклизации н-гептана). При этом высокое содержание такого отсева в носителе (от 50 до 100 % мас.) увеличивает механическую прочность носителя до 30 % абс., что, вероятно, связано с повторным модифицированием структуры гидроксида алюминия во время его "ресинтеза".

В работе показана возможность вовлечения в процесс приготовления носителя помола отсева прокаленного носителя в количествах 1-2%, что практически не влияет на снижение механической прочности, а также не сказывается на целевых показателях работы катализатора. Таким образом могут быть снижены потери при производстве за счет добавления в носители катализаторов риформинга небольших количеств отсева прокаленного носителя. Такие добавки не влияют на каталитические свойства образцов в модельной реакции риформинга – дегидроциклизации н-гептана.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – грант № 18-33-00791.

Библиографический список

1. Пахомов Н. А. Научные основы приготовления катализаторов: введение в теорию и практику. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. 262 с.
2. Стайлз Э. Носители и нанесенные катализаторы. Теория и практика. М.: Химия, 1991. 240 с.
3. Строение и свойства адсорбентов и катализаторов / Под ред. Б. Линсен. М.: Мир, 1973. 656 с.
4. Ross J. R. H. Heterogeneous Catalysis: Fundamentals and Applications. Elsevier, 2012. 222 p.

УДК 621.7.011:621.787:620.179.17

И.Н. Градусов, П.А. Рябинкина, А.А. Никулина

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В МНОГОФАЗНОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ СПЕКАНИЕМ

Аннотация. В исследовательской работе представлены результаты структурных исследований образцов многофазной стали, полученных с помощью электроискрового спекания стружки углеродистой и высоколегированной сталей при различных режимах. Структура материала характеризуется наличием аустенитных и феррито-перлитных зон, а также областью с аустенито-мартенситной структурой. С помощью моделирования диффузионных процессов были определены теоретические значения толщины переходной области. В ходе металлографического анализа были определены значения толщины

аустенито-мартенситных слоев реальных образцов. В ходе более тонких структурных исследований с использованием просвечивающего электронного микроскопа было установлено, что межпластинчатое расстояние перлита вблизи переходной области составляет приблизительно 100 нм.

Ключевые слова: прогрессивные стали повышенной прочности, железоуглеродистые сплавы, электроискровое спекание, гетерофазная структура.

Введение. В последнее время среди применяемых в автомобилестроении материалов возрастает доля прогрессивных сталей повышенной прочности [1,2]. Это связано с высоким пределом прочности при относительно высокой пластичности гетерофазных сталей. Как правило, гетерофазные стали содержат фазы феррита, мартенсита, а также могут содержать аустенит и бейнит [2-4].

Одним из современных направлений исследования гетерофазных железоуглеродистых сплавов является получение мелкозернистых двухфазных и многофазных сталей, изучение их структуры и свойств. Значительное улучшение комплекса механических свойств в таких материалах достигается за счет измельчения структурных составляющих, а также посредством их более равномерного распределения по объему материала [5-7].

Одной из современных технологий, отвечающей таким требованиям, является электроискровое спекание, характеризующееся быстрым нагревом и небольшим временем выдержки по сравнению с традиционными технологиями порошковой металлургии [8-10]. Преимущества технологии обеспечивают однородную и мелкозернистую структуру материала [8].

Целью данной работы является исследование особенностей микроструктуры многофазной стали, полученной с помощью электроискрового спекания при различных режимах.

Материалы и методы исследования. Многофазная сталь была получена с помощью электроискрового спекания стружки сталей У8 и 12Х18Н10Т. Стали были выбраны исходя из разнородности по химическому составу, исходным структурам и свойствам. Химический состав сталей представлен в Таблице 1.

Стружка разнородных сталей была получена механическим способом. Для более равномерного распределения частиц углеродистой и высоколегированной сталей по объему шихты использовалась планетарная мельница со скоростью вращения барабана 100 об/мин в течение 20 минут. Частицы хромоникелевой стали не превышали в максимальном размере 1000 мкм, высокоуглеродистой стали 500 мкм.

Таблица 1

Химический состав исходных сталей

Хим. элемент, % вес.	Cr	Ni	Si	Mn	C	Fe
сталь 12Х18Н10Т	18,82	8,59	0,58	1,53	0,20	ост.
сталь У8	0,36	-	0,38	0,97	0,79	ост.

Электроискровое спекание стружек проводилось при температурах 1000, 1100 °С и одноосном давлении 60 МПа. Время выдержки для каждой температуры составляло 5, 10, 15, 20 и 25 минут.

Структурные исследования проводились с использованием оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m и просвечивающего электронного микроскопа Tescna G2 FEI. Химический анализ локальных участков определялся с помощью растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50 XVP с энергодисперсионным спектрометром.

Результаты и обсуждение. Перед спеканием реальных образцов с помощью метода конечных разностей было выполнено математическое моделирование диффузионных процессов, протекающих в области границы между частицами углеродистой и аустенитной сталей в процессе искрового плазменного спекания. В результате моделирования были определены теоретические значения глубины диффузии легирующих элементов, а также значения толщины областей с измененным химическим составом (Таблица 2).

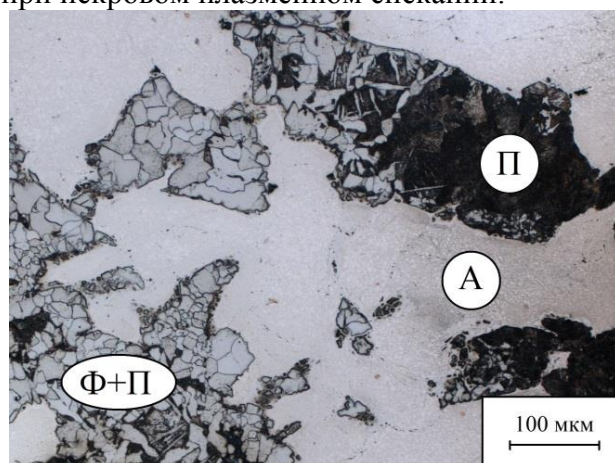
Таблица 2

Толщины областей с переходным химическим составом, мкм

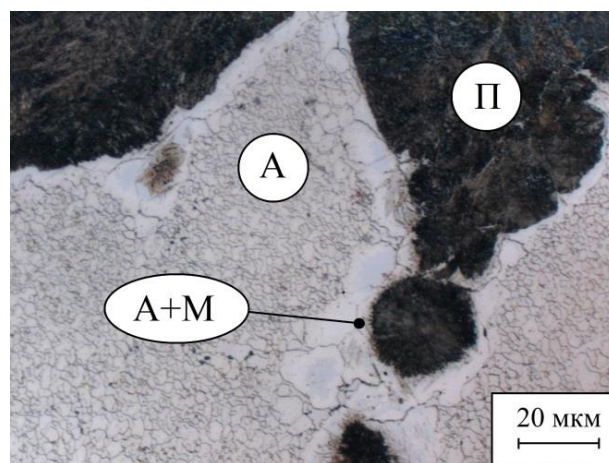
Элемент, режим		5 мин	15 мин	25 мин
Cr	1000 °C	4	10	12
	1100 °C	5	12	20
Ni	1000 °C	3	6	11
	1100 °C	4	11	14
C	1000 °C	600	1500	2400
	1100 °C	750	1800	2850

На Рис. 1 приведены изображения структуры образцов многофазной стали, полученные с помощью оптического микроскопа. Темные области соответствуют структурам перлитного типа, образовавшимся на месте частиц углеродистой стали. Светлые участки соответствуют фазе γ -Fe стали аустенитного класса.

На Рис. 1б приведено изображение переходной зоны с аустенито-мартенситной структурой. Такая структура обусловлена переходным химическим составом, образовавшимся вследствие взаимодиффузии частиц углеродистой и легированной сталей при искровом плазменном спекании.



а



б

Рис. 1. Общий вид многофазной стали, полученной спеканием при 1100 °C и выдержке 15 мин (а); Область взаимодействия частиц разнородных сталей (б): А – аустенит ; М – мартенсит ; П – перлит ; Ф – феррит

Толщина зон с переходным химическим составом варьируется в интервале от 0,3 до 12 мкм в зависимости от времени выдержки и температуры спекания, с повышением которых возрастает продолжительность и интенсивность диффузионных процессов. Средние значения толщины переходных областей приведены в Таблице 3.

Таблица 3

**Толщина переходных слоев в спекенных образцах
в зависимости от температуры спекания и времени выдержки**

Температура\Время	5 мин	15 мин	25 мин
1000 °C	$0,8 \pm 0,54$ мкм	$2,2 \pm 0,60$ мкм	$5,3 \pm 1,22$ мкм
1100 °C	$4,6 \pm 1,34$ мкм	$5,6 \pm 1,76$ мкм	$8,8 \pm 2,33$ мкм

Также были проведены структурные исследования с помощью просвечивающего электронного микроскопа. На Рис. 2а приведено изображение границы пластинчатого перлита с аустенито-мартенситной областью. Присутствие двойников в некоторых зернах аустенита (Рис. 2б) свидетельствует о сложных условиях пластического течения и невозможности реализации пластической деформации путем скольжения одной части кристалла относительно другой. Межпластинчатое расстояние перлита вблизи переходной области составляет приблизительно 100 нм [11].

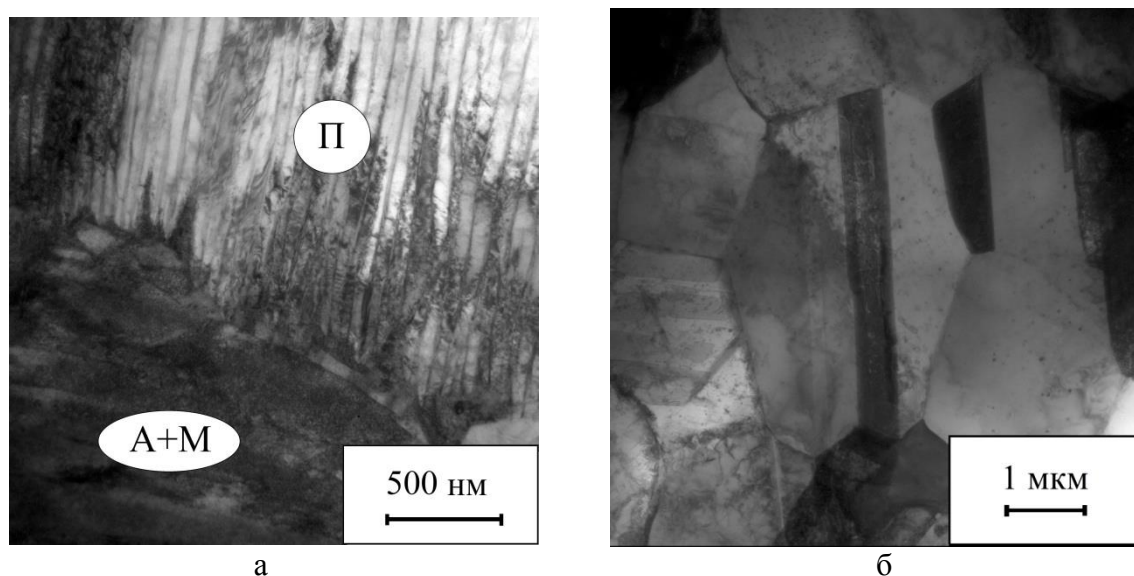


Рис. 2. Граница перлита с переходной областью (а), двойник в зерне аустенита (б)

Выводы. Структура многофазной стали, полученной с помощью искрового плазменного спекания частиц сталей У8 и 12Х18Н10Т, состоит из феррито-перлитных областей, зерен аустенита, а также аустенито-мартенситных слоев.

Наличие мартенсита связано с реализацией промежуточного химического состава при диффузионном взаимодействии разнородных микрообъемов.

Исследования структуры образцов многофазной стали посредством просвечивающего электронного микроскопа показали, что межпластинчатое расстояние перлита вблизи переходной области составляет около 100 нм.

С помощью моделирования взаимодиффузии частиц разнородных сталей были определены теоретические значения толщины переходной области, которые составили 4...20 мкм для атомов Сг, 3...14 мкм для Ni и 600...2850 мкм для С. Структурные исследования показали, что, в соответствии с результатами математического моделирования, значения толщины областей с аустенито-мартенситной структурой в спеченных образцах варьировались от $0,8 \pm 0,54$ до $8,8 \pm 2,33$ мкм в зависимости от режимов спекания.

Библиографический список

1. Abid N. H., Abu Al-Ruba R. K., Palazotto A. N. Computational modeling of the effect of equiaxed heterogeneous microstructures on strength and ductility of dual phase steels // Computational Materials Science. 2015. Vol. 103. P. 20–37.
2. Hudgins A. W., Matlock D. K. The effects of property differences in multiphase sheet steels on local formability // Materials Science and Engineering: A. 2016. Vol. 654. P. 169–176.
3. Никулина А. А. Формирование неоднородной структуры железоуглеродистых сплавов спеканием частиц разнородных сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 3 (72). С. 52–61.

4. Movahed P., Kolahgar S., Parvin N. The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steel sheets // *Materials Science and Engineering: A*. 2009. Vol. 518. P. 1–6.
5. Li P., Li J., Meng Q. Effect of heating rate on ferrite recrystallization and austenite formation of cold-roll dual phase steel // *Journal of Alloys and Compounds*. 2013. Vol. 578. P. 320–327.
6. Radwański K. Structural characterization of low-carbon multiphase steels merging advanced research methods with light optical microscopy // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 16. P. 282–293.
7. Kuziak R., Kawalla R., Waengler S. Advanced high strength steels for automotive industry: a review // *Arch. Civ. Mech.* 2008. Vol. 89. P. 103–117.
8. Tokita M. Trends in Advanced SPS (Spark Plasma Sintering) Systems and Technology // *J. Soc. Powd. Tech. Japan*. 1993. Vol. 30. P. 790–804.
9. Song Sh., Wang Zh., Guo-Pu Sh. Heating mechanism of spark plasma sintering // *Ceramics International*. 2013. Vol. 39. P. 1393–1396.
10. Munir Z. A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M. The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: a review of the spark plasma sintering method // *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 41. P. 763–777.
11. Nikulina A. A., Smirnov A. I., Bataev A. A., Ivashutenko A. S. Features of heterophase structure formation at spark plasma sintering of high-carbon and chromium-nickel steels // *Materials Characterization*. 2017. Vol. 129. P. 252–259.

УДК 620.187

А.В. Захаров

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

КАЛИБРОВКА ДАТЧИКА ТОЛЩИНЫ SYCON STC–2000A ДЛЯ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ЦИРКОНИЯ НА УСТАНОВКЕ ADVAVAC VSM–200

Аннотация. Широкая область применения циркониевых покрытий требует выбора оптимального способа их получения. Одним из таких способов является метод магнетронного распыления, при этом важным условием получения покрытий с заданными свойствами является контроль их толщины. Цель работы состоит в калибровке датчика толщины Sycon STC–2000A для магнетронного распыления циркония на установке ADVAVAC VSM–200. Применение энергодисперсионного анализа позволило получить калибровочную зависимость толщины циркониевого покрытия, формируемого при заданных параметрах процесса, от времени процесса магнетронного распыления циркония.

Ключевые слова: цирконий, магнетронное распыление, толщина покрытия, калибровка датчика толщины.

В настоящее время цирконий и его сплавы получили широкое распространение в различных областях науки и техники, что связано с его особыми физико-химическими свойствами [1]. К основным направлениям применения циркония, его сплавов и оксидов относятся [2–4]:

- 1) атомная энергетика (в связи с малым сечением захвата нейтронов и высокой жаростойкостью циркония);
- 2) химическое машиностроение (благодаря высокой коррозионной стойкости циркония);

- 3) электроника (из-за высокой диэлектрической проницаемости оксида циркония);
- 4) медицина (в связи с инертностью циркония в биологической среде и его биосовместимостью).

В ряде случаев практического применения более перспективным является использование не самого циркония, а его пленок на различных материалах, полученных каким-либо технологическим методом. Это связано с удешевлением готового продукта, с необходимостью сочетания свойств матрицы со свойствами покрытия, с технологическими особенностями конструктивных элементов интегральных схем в микро- и нанoeлектронике.

В настоящее время существует много различных способов получения тонкопленочных циркониевых покрытий. Среди них наибольшее распространение получили следующие методы: магнетронное распыление [2], ионно-лучевое распыление [5], лазерное распыление [6], золь-гель [7] и другие.

Одним из важных условий получения тонкопленочного покрытия с заданными свойствами является необходимость контроля толщины формируемого покрытия [8]. В статье представлены результаты калибровки датчика толщины Sycon STC-2000A для магнетронного распыления циркония на установке ADVAVAC VSM-200.

Sycon STC-2000A – это универсальный контроллер для определения скорости осаждения и толщины покрытий, получаемых вакуумными методами. Измеряющим элементом является кварцевый сенсор, работающий на частоте 6 МГц. Прибор в режиме реального времени обеспечивает расчет толщины получаемой пленки по данным изменения частоты колебаний в кристалле кварца, связанных с увеличением массы кристалла в процессе формирования покрытия.

Особенностью функционирования датчика толщины является необходимость его предварительной настройки с учетом параметров распыляемого материала и его последующей калибровки для контроля толщины формируемого покрытия в процессе распыления мишени.

На первоначальном этапе для корректной работы датчика необходимо установить калибровочные параметры для циркония (выполняется при помощи программного обеспечения): Z-фактор и параметр плотности распыляемого материала. Z-фактор – это поправка, обеспечивающая достоверность показаний при изменении сдвига резонансной частоты более чем на 10%. Параметр плотности – характеристика, зависящая от условий распыления катода-мишени. Эти параметры являются табличными данными для распыляемого материала и приведены в руководстве к контроллеру [9, с. 269–271].

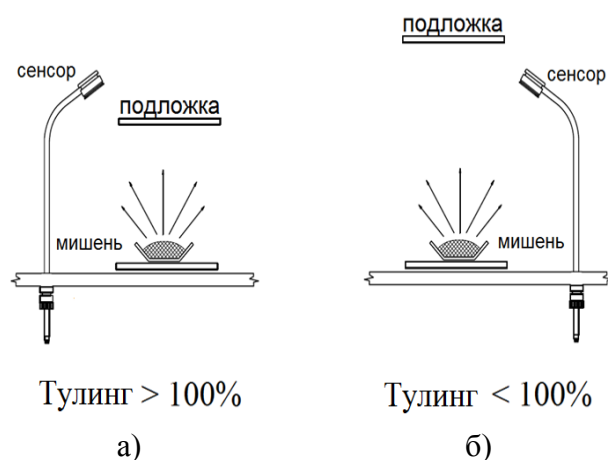


Рис. 1. Способы расположения датчика толщины в системе мишень–подложка: а – сенсор расположен над подложкой, б – сенсор расположен между мишенью и подложкой

Еще одним калибровочным параметром датчика толщины является «тулинг» (T_l). Этот параметр зависит от расположения датчика (рис. 1) относительно подложки и мишени и определяется как отношение толщины покрытия, измеренной на независимом приборе, к толщине, регистрируемой датчиком.

В работе расположение кварцевого датчика соответствует случаю б на рис.1. Рассчитать значение «тулинга» можно по формуле (1).

$$T_l = \frac{D_{изм}}{D_{датч}} \cdot 100\% \quad (1),$$

где $D_{изм}$ – толщина покрытия, измеренная сторонним прибором, $D_{датч}$ – толщина, измеренная датчиком.

В качестве альтернативного способа измерения толщины покрытия использовался растровый электронный микроскоп Jeol JCM–5700, оснащенный энергодисперсионным спектрометром JED–2300. Распыление циркония на предметное стекло проводилось на установке ADVAVAC VSM–200 в течение 21 минуты 55 секунд, что соответствует толщине 513 нм (рекомендованное производителем датчика значение – 5 кÅ), после чего проводился энергодисперсионный анализ «по линии» торцевой поверхности полученного образца с целью измерения толщины покрытия. Результаты исследования толщины циркониевого покрытия приведены на рис. 2. Анализ интенсивности спектральных линий химических элементов (кислород, натрий, магний, кремний и кальций) позволяет сделать вывод о том, что в левой части микрофотографии находится изображение предметного стекла (спектральные линии красного, зеленого, желтого, синего и бирюзового цвета). Циркониевое покрытие (спектральная линия черного цвета) находится в правой части микрофотографии, при этом видна граница между покрытием и подложкой (пересечение синей и черной линий). На рис. 2б представлены результаты измерения толщины циркониевого покрытия вдоль его границы раздела с предметным стеклом.

Результаты расчетов показали, что толщина циркониевого покрытия составила $d=(389,5 \pm 6,2)$ нм при $t_{\alpha,n}=1,943$, $\alpha=0,9$ и $\varepsilon=1,6\%$. Используя формулу (1), рассчитан поправочный коэффициент «тулинг», его значение составляет 76 %.

Табличные и калибровочные параметры для циркония приведены в таблице 1.

Таблица 1

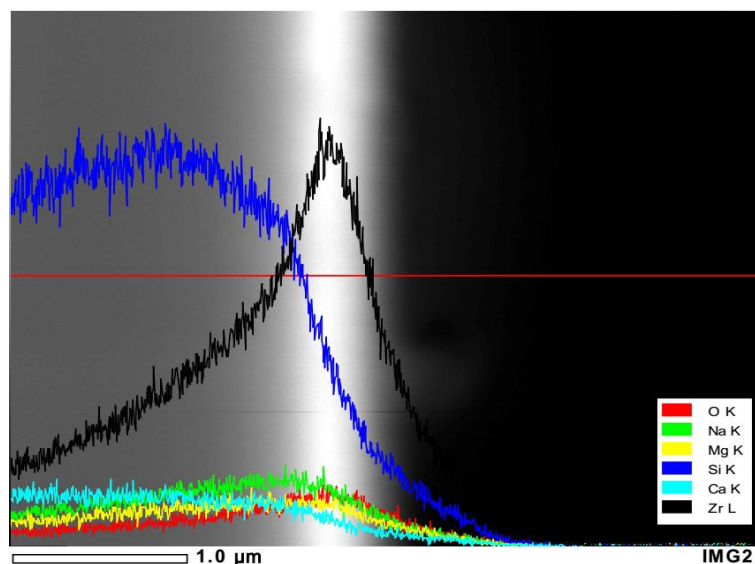
Калибровочные параметры для циркония

Материал	Параметр плотности (г/см ³)	Z-фактор	«Тулинг» (%)
Zr (Цирконий)	6,51	0,600	76

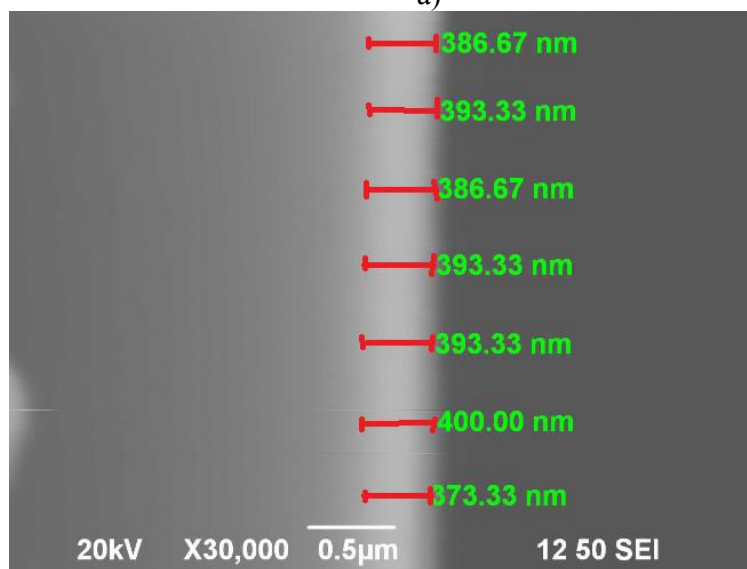
После внесения в программное обеспечение контроллера табличных и калибровочных параметров датчик измеряет «истинную» толщину получаемого циркониевого покрытия в режиме реального времени, что позволяет найти экспериментальную зависимость толщины тонкопленочного покрытия от времени распыления при определенных параметрах процесса. Калибровка датчика проводилась при следующих параметрах магнетронного распыления: скорость распыления – 3,1 Å/с, мощность магнетрона постоянного тока – 200 Вт, давление аргона в камере – 0,37 Па.

Полученная зависимость толщины циркониевого покрытия от времени представлена на рис. 3.

В соответствии с рис. 3 зависимость толщины циркониевого покрытия от времени при заданных параметрах процесса распыления является линейной.



а)



б)

Рис. 2. Результаты исследования торцевой стороны системы предметное стекло – циркониевое покрытие: а – энергодисперсионный анализ бинарной системы по линии, б – результаты измерений толщины циркониевого покрытия.

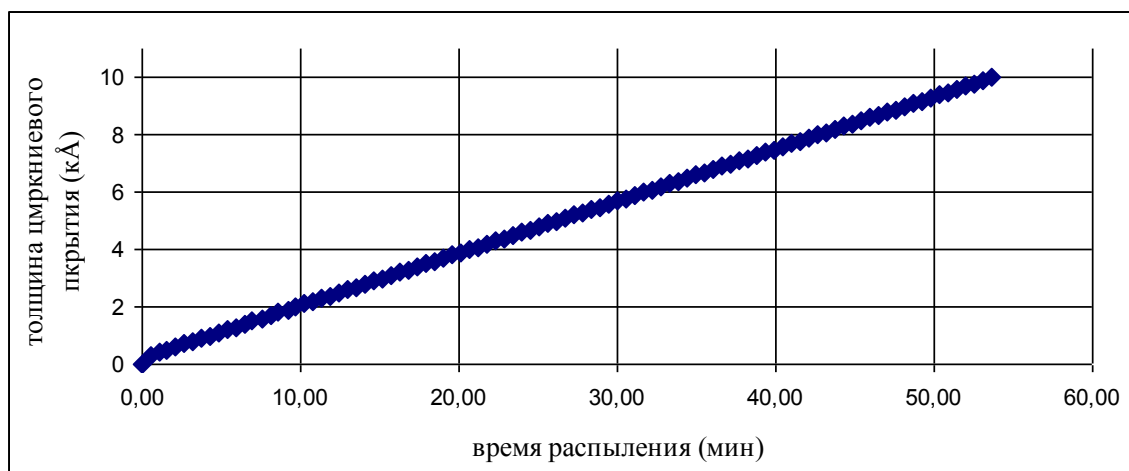


Рис. 3. Зависимость толщины циркониевого покрытия от времени

В ходе работы проведена калибровка датчика толщины Sycon STC–2000A для магнетронного распыления циркония на установке ADVAVAC VSM–200. Применение энергодисперсионного анализа позволило получить калибровочную зависимость толщины циркониевого покрытия, формируемого при заданных параметрах процесса, от времени процесса магнетронного распыления циркония. Интерполяция полученной зависимости позволяет определять толщину покрытия при заданных параметрах процесса двумя способами – по времени распыления и по показаниям датчика толщины.

Библиографический список

1. Пилипенко Н. Н., Дробышевская А. А., Ажажа Р. В. [и др.]. Термооксидные покрытия на циркониевых материалах //ФП ФИП PSE . 2013. Т. 11, № 2. С. 231–236.
2. Вилья Н., Голосов Д. А., Завадский С. М. [и др.]. Формирование пленок оксида циркония методом реактивного магнетронного распыления // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 12–ой Международной конференции. Секция 6. Современное оборудование и технологии, 19-22сентября 2017 г. Беларусь, Минск, 2017. С. 438–440.
3. Шиков А. К., Никулин А. Д., Никулина А. В. [и др.]. Современное состояние и перспективы развития производства циркония и его сплавов и изделий из них // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 6. С. 5–14.
4. Шапошников Ю. Г., Шерепо К. М., Горохов В. Ю. Берченко Г. Н. Цирконий для эксплантатов в травматологии и ортопедии // Ортопедия, травматология и протезирование. 1993. № 1. С. 31–33.
5. Валюхов С. Г., Стогней О. В., Филатов М. С., Каширин М. А. Структура, термостойкость и микротвердость покрытий ZrO_2 , полученных разными методами // Неорганические материалы. 2016. Т. 52, № 4. С. 457–463.
6. Balakrishnan G., Thanigaiarul K., Sudhakara P., Song Jung Il Microstructural and optical properties of nanocrystalline undoped zirconia thin films prepared by pulsed laser deposition //Appl Phys A (2013) 110: 427–432. DOI: 10.1007/s00339-012-7232-8
7. Kavitha A., Sankara Subaramanian N., Vadivel S. Influence of Sol Concentration on the Properties of Spin Coated Zirconia Thin Films // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 73 (2015) 012005 DOI:10.1088/1757-899X/73/1/012005
8. Сорокин Ю. С. Формирование покрытий заданной толщины посредством магнетронного распыления материала модификатора // Физическое образование в вузах. 2015. Т. 21. С. 79-80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23179661> (дата обращения 10.03.2018)
9. Users manual: Sycon STC–2000A Deposition Controller// Rev A, January 7, 2004.

УДК 620.18

И.В. Иванов, Е.И. Ткаченко, Е.А. Руденя

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ

Аннотация. В работе сравнивалась коррозионная стойкость нержавеющей стали после электронно-лучевой наплавки со стойкостью технической стали. Обнаружено, что

скорость коррозии двух материалов практически одинакова, а ее значения находятся в пределах от 0,227 до 0,296 мм/год. Однако материал, полученный методом электронно-лучевой наплавки, обладает повышенным сопротивлением питтинговой коррозии.

Ключевые слова: нержавеющая сталь, биоматериал, коррозионная стойкость, питтинговая коррозия

На сегодняшний день применение биоматериалов стало жизненно необходимым вследствие их особенного влияния на качество и продолжительность жизни человека. Для изготовления обширного перечня медицинских инструментов и оборудования незаменимым материалом является сталь, поскольку благодаря ее механическим свойствам она выдерживает удары, не царапается, не вступает в химические реакции с тканями организма и межтканевыми жидкостями. Твердость и прочность позволяет инструменту долго не тупиться, не гнуться и не ломаться. Благодаря высокой плотности – 7,8 г/см³, в структуре стали отсутствуют микропоры, которые могут являться причиной скопления пыли, грязи, а также болезнетворных организмов [1]. Устойчивость стали к высоким и низким температурам позволяет различными способами стерилизовать изделия.

Материалы из нержавеющей стали устойчивы к широкому диапазону коррозионных агентов благодаря высокому содержанию хрома [2], на поверхности материала образуется инертная пленка, которая защищает изделие от неблагоприятных воздействий. Титан, входящий в состав данной стали, позволяет уменьшить ее склонность к межкристаллитной коррозии.

Любые хирургические, стоматологические инструменты, оборудование, посуду, изготовленные из хромоникелевой стали, можно подвергать воздействию кислотнo-щелочных сред. Однако материал не используют для внедрения в человеческий организм в качестве имплантатов, поскольку такие ионы, как Ni²⁺ и Cr³⁺, входящие в состав стали, вызывают аллергические и токсические реакции в организме.

Целью работы являлось исследование коррозионной стойкости материала, полученного методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки, схожего по химическому составу с нержавеющей сталью 12X18H10T.

Для исследования использовался материал, наплавленный методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки с применением порошков чистых элементов (ЕВС321). В качестве образца сравнения использовалась заводская нержавеющая сталь марки 12X18H10T (ТЕСН321).

Коррозионная стойкость оценивалась с использованием потенциостата-гальваностата «Elins Р30-S». Испытания проводились в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки 2 мВ/с. В качестве биологической среды был выбран раствор Рингера-Локка [3].

Таблица 1

Поляризационное сопротивление, плотность тока коррозии, а также скорость коррозии исследуемых в работе материалов

	ТЕСН321	ЕВС321
R _p , мВ·см ² /μА	714,810	697,270
j _{corr} , μА/см ²	0,021 -0,026	0,020 - 0,025
CR, мм/год	0,240 - 0,296	0,227 - 0,286

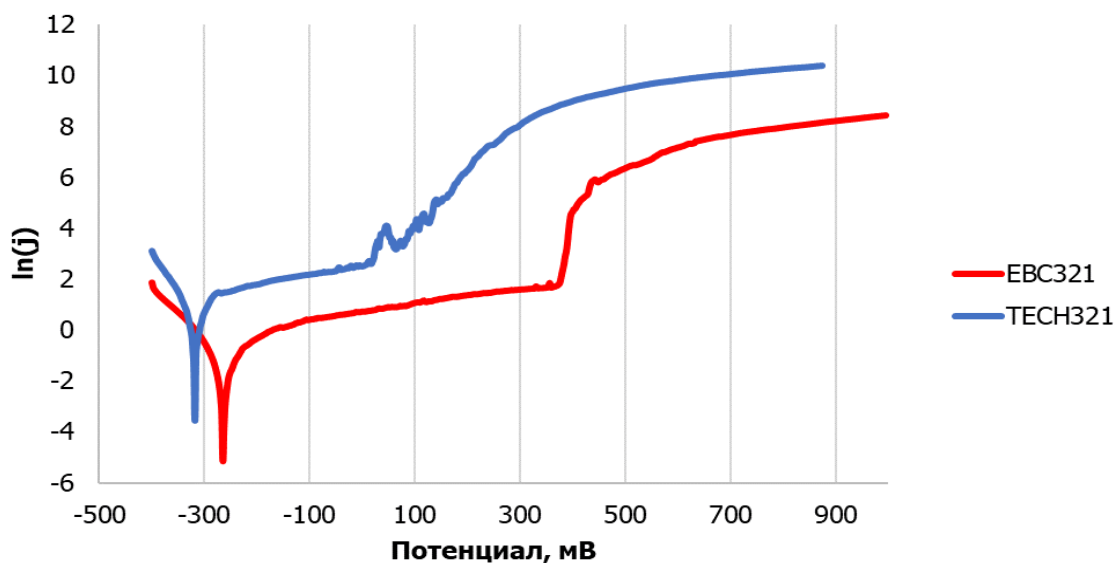


Рис. 1. Потенциодинамические кривые материалов, полученные в результате исследований в растворе Рингера-Локка

Было обнаружено, что образец EBC321 более стоек к окислению, по сравнению с TECH321. Согласно результатам проведенных расчетов (табл. 1), скорости окисления (CR) TECH321 и EBC321 практически не различаются и находятся в пределах 0,227 – 0,296 мм/год. Однако, как следует из рис. 1, потенциалы пробоя пассивирующей пленки ($E_{breakdown}$), характеризующие сопротивление материала питтинговой коррозии, заметно различаются. В случае TECH321 процесс питтингообразования происходит плавно, а в случае EBC321 – скачкообразно. Вполне вероятно, что данное явление связано с неравномерностью химического состава материала, полученного в результате электронно-лучевой наплавки.

Библиографический список

1. Новиков В. Т. Оборудование и основы проектирования систем охраны окружающей среды: Учебн. пос. // Томск: Том. политехн. ун-т, 2006. С. 7–10.
2. Комарова Е. Г. Закономерности формирования структуры и свойств микродуговых покрытий на основе замещённых гидроксиапатитов на сплавах титана и ниобия // Томск, 2017. С. 26.
3. Tas A. C. The use of physiological solutions or media in calcium phosphate synthesis and processing // Acta biomaterialia. 2014. Т. 10, № 5. С. 1771–1792.

УДК 53.09

Л.Ф. Калистратова, Д.И. Березин

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

СТРУКТУРНЫЙ ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В СИСТЕМЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ CdSe – ZnSe

Аннотация. Рентгенографическим методом исследована структура твердых растворов селенидов кадмия и цинка, родоначальниками которых изначально являлись CdSe

с гексагональной кристаллической решеткой и ZnSe с кубической решеткой. В твердых растворах CdSe–ZnSe структурный фазовый переход соединений со структурой сфалерита в соединения со структурой вюрцита наблюдается при концентрации (68 ± 5) масс. % селенида цинка. Он сопровождается скачкообразным увеличением в 2 раза объема кристаллической ячейки и уменьшением в 4 раза углового коэффициента линейной концентрационной зависимости рентгеновской плотности.

Ключевые слова: кристаллическая ячейка, рентгеновская плотность, селениды, твердый раствор, фазовый переход.

Введение. Соединения типа A^2B^6 имеют две структурные модификации: кубического типа (вюрцит) или гексагонального типа (сфалерит). Стабилизации той или иной модификации способствует температурный режим исследований, введение различных добавок или создание особых условий. Важной особенностью селенида кадмия является то, что он способен к образованию непрерывного ряда твердых растворов с селенидом цинка при наличии в этой системе фазового структурного перехода. Следует заметить, что структурный переход в системе твердых растворов CdSe – ZnSe можно получить не только варьированием состава компонентов твердых растворов [1], но и при высоких давлениях [2]. Возможность варьирования плавным изменением состава компонентов твердых растворов в системе CdSe – ZnSe позволяет прогнозировать улучшение тех или иных свойств, характерных для «прародителей» этих твердых растворов и необходимых для их технического применения.

Причина повышенного интереса к халькогенидным соединениям связана с их широким применением для создания устройств радиотехнического профиля, так как многие из них являются примесными полупроводниками. Благодаря хорошим электрическим свойствам халькогениды рассматриваемого типа широко используются для изготовления фоторезисторов, приемников ИК–излучения, а также в качестве рабочего тела полупроводниковых лазеров, возбуждаемых электронным пучком. Электрические свойства пленочных образцов некоторых селенидов описаны в работах [3–6]. Так как особое применение соединения типа A^2B^6 находят при изготовлении солнечных батарей, то существенную роль при практическом применении халькогенидных соединений играет выяснение степени и характера взаимодействия вещества с различными средами, поэтому важными являются исследования адсорбционных свойств в разных средах [1, 5, 6]. Отсутствие всесторонней информации о влиянии среды на структуру и физико-химические свойства делают актуальными любые исследования в этом направлении.

Хорошо известно, что любые свойства вещества напрямую зависят от структуры и плотности вещества. Частичные сведения о структуре твердых растворов в системе CdSe – ZnSe приводятся в работе [1], в которой отмечается, что в этих соединениях наблюдается фазовый структурный переход, но конкретно не указаны параметры этого перехода. Заметим, что рентгенографические исследования твердых растворов автором работы [1] были выполнены под руководством одного из авторов данного сообщения.

Цель настоящей работы заключается в детальном рентгенографическом изучении структурного фазового перехода в твердых растворах CdSe – ZnSe посредством расчетов параметров кристаллических решеток и плотности на основе компьютерной программы.

Объекты и методики исследований. Для получения поликристаллических образцов твердых растворов селенидов цинка и кадмия была использована стандартная методика непосредственного сплавления соответствующих компонентов. Аттестация полученных образцов и изучение их структурного состояния проводилась по рентгенограммам, полученным на рентгеновском дифрактометре в медном монохроматическом излучении ($\lambda = 0.154$ нм). Расшифровка рентгенограмм производилась по квадратичным формам, описывающим гексагональную и кубическую сингонии [7].

Рентгеновская плотность чистых веществ рассчитывается по формуле [7]:

$$\rho = \frac{nM}{kVN_A}, \quad (1)$$

где M – молярная масса соединения, n – число атомов, приходящихся на элементарную ячейку, k – одинаковое число атомов в химической формуле соединения, N_A – число Авогадро. Объем элементарной ячейки $V = 0,866 a^2 c$ для гексагональной ячейки CdSe (сфалеритной модификации) и $V = a^3$ для кубической ячейки ZnSe (вюрцитной модификации).

Рентгеновская плотность твердых растворов замещения CdSe – ZnSe рассчитывается по формулам [7]:

$$\rho = \frac{M}{V_{\text{зекс}}},$$

где

$$M_{CdSe} = \frac{2[(CM)_{ZnSe} + (CM)_{CdSe}]}{N_A}$$

$$C_{ZnSe} = \frac{\frac{x}{M_{ZnSe}}}{\frac{x}{M_{ZnSe}} + \frac{1-x}{M_{CdSe}}}$$

$$C_{CdSe} = \frac{\frac{1-x}{M_{CdSe}}}{\frac{x}{M_{ZnSe}} + \frac{1-x}{M_{CdSe}}}$$

В формулах: C_{ZnSe} и C_{CdSe} – концентрации ZnSe и CdSe в твердых растворах соответственно, M – их молярные массы; x – концентрация ZnSe в образце твердого раствора CdSe – ZnSe.

Результаты и их обсуждение. Расчет рентгенограмм поликристаллических порошковых образцов исследуемых селенидов показал, что в чистом виде селенид кадмия находится в модификации сфалерита с параметрами гексагональной ячейки $a = (0,430 \pm 0,008)$ нм, $c = (0,695 \pm 0,028)$ нм, а селенид цинка – в модификации вюрцита с параметрами кубической ячейки $a = (0,566 \pm 0,009)$ нм (табл. 1, 2). Рентгеновская плотность, вычисленная на основании формулы (1) для чистых порошковых соединений CdSe и ZnSe соответственно, равна $\rho = 5,71 \cdot 10^3$ и $5,29 \cdot 10^3$ кг/м³. Эти результаты находятся в хорошем соответствии с табличными и литературными данными [5, 6].

Из графических зависимостей следует, что в исследуемой системе твердых растворов структурный переход происходит при концентрации (68 ± 5) ZnSe (рис. 1). Для этой концентрации плотности твердых растворов получились одинаковыми как при расчете со стороны кубической решетки ZnSe, так и со стороны гексагональной решетки CdSe. Фазовый переход сопровождается скачкообразным увеличением (практически в 2 раза) объема кристаллической ячейки и преломлением линейной концентрационной зависимости плотности: угловой коэффициент зависимости плотности от содержания ZnSe при переходе от сфалеритной области существования структурных организаций твердых растворов к вюрцитной области уменьшился в 2 раза.

Рентгенографические значения параметров элементарной ячейки, расчетные данные объема ячейки и плотности образцов твердых растворов CdSe– ZnSe представлены в табл. 3.

Таблица 1

**Экспериментальные и табличные значения межплоскостных расстояний
для порошковых образцов CdSe**

	Θ	$\sin^2 \Theta$	(hkl)	d/n _{эксп}	d/n _{табл.}
1	11°57′	0,042873	(100)	3,71	3,74
2	12°47′	0,048958	(002)	3,48	3,49
3	13°37′	0,05542	(101)	3,28	3,30
4	17°40′	0,09221	(102)	2,54	2,56
5	21°05′	0,1294	(110)	2,14	2,14
6	22°55′	0,1516	(103)	1,98	1,99
7	24°30′	0,1720	(200)	1,86	1,87
8	24°55′	0,1775	(112)	1,83	1,84
9	25°25′	0,1850	(004)	1,80	1,80
10	28°00′	0,2204	(202)	1,64	1,65
11	32°00′	0,2808	(203)	1,46	1,46
15	38°28′	0,3870	(300)	1,24	1,24
17	41°15′	0,4348	(006)	1,169	1,17
18	45°50′	0,5745	(220)	1,08	1,08

Таблица 2

**Экспериментальные и табличные значения межплоскостных расстояний
для порошковых образцов ZnSe**

	Θ	$\sin^2 \Theta$	(hkl)	d/n _{эксп}	d/n _{табл.}
1	13°39′	0,0557	(111)	3,27	3,27
2	22°36′	0,1477	(220)	2,006	2,01
3	26°50′	0,2038	(311)	1,705	1,70
4	32°57′	0,2958	(400)	1,416	1,415
5	36°18′	0,3505	(331)	1,302	1,298
6	41°48′	0,4443	(422)	1,157	1,156
7	44°57′	0,4991	(511)	1,090	1,091
8	50°18′	0,5920	(440)	1,002	1,000
9	53°36′	0,6478	(531)	0,958	0,956

Таблица 3

**Экспериментальные значения параметров, объема элементарной ячейки и плотности
твердых растворов системы CdSe– ZnSe**

Концентрация ZnSe %	a , нм	c , нм	$V \cdot 10^{-30}$, нм ³	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³
0	0.432±0.008	0.707±0.028	113	5.61
20	0.426± 0.005	0.695±0.011	109	5.48
25	0.423±0.007	0.695±0.011	108	5.45
30	0.421±0.007	0.693±0.019	106	5.45
40	0.416±0.004	0.689±0.010	104	5.40
50	0.413±0.001	0.689±0.016	102	5.36
65	0.579±0.003	-	200	5.32
70	0.578±0.002	-	193	5.36
100	0.566±0.009	-	181	5.29

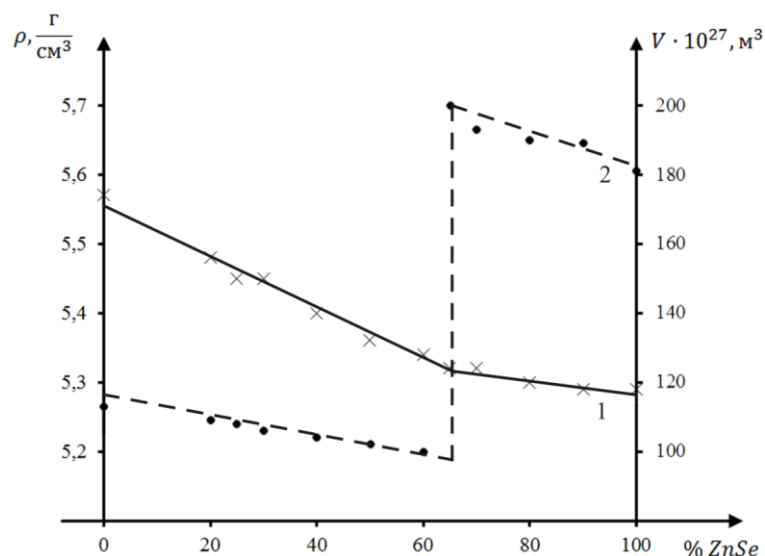


Рис. 1. Концентрационные зависимости рентгеновской плотности (1) и объема кристаллической ячейки (2) в твердых растворах CdSe – ZnSe

Выводы

1. Установлено, что в твердых растворах системы CdSe – ZnSe структурный фазовый переход соединений со структурой сфалерита (родоначальник CdSe) в соединения со структурой вюрцита (чистый ZnSe) наблюдается при концентрации (68 ± 5) масс. % селенида цинка.
2. Структурный переход сопровождается скачкообразным увеличением в 2 раза объема кристаллической ячейки и уменьшением в 4 раза углового коэффициента линейной концентрационной зависимости плотности.

Библиографический список

1. Буданова Е. М. Кислотно-основные и адсорбционные свойства поверхности полупроводниковых твердых растворов системы ZnSe – CdSe. Диссертация: URL: <http://fizmathim.com/kislotno-osnovnye-i-adsorbtsionnye-svoystva-poverhnosti-poluprovodnikovyyh-tverdyh-rastvorov-sistemy-znse-cdse#ixzz4dkGpNlVj> (обращение 2017 г.)
2. Игнатченко О. Ф., Бабушкин А. Н. Электропроводность и термоэдс фазы высокого давления селенида кадмия в области вероятного перехода полупроводник–металл // ФТТ. 1993. Т. 35, № 8. С. 2231–2234.
3. Ali N., Hussain A., Ahmed R. [et al.]. Advances in nanostructured thin film materials for solar cell applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. V. 59. P. 726–737.
4. Волков А. В., Казанский Н. Л., Моисеев О. Ю. Формирование микрорельефа с использованием халькогенидных стеклообразных полупроводников // Компьютерная оптика. 2002. № 24. С. 74–77.
5. Даньшина В.В., Калистратова Л.Ф. Влияние типа и давления газовых сред на электрические свойства полупроводниковых тонких плёнок // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. Т. 3, № 1. С. 246–252.
6. Dan'shina V. V., Kalistratova L. F. Comparative Analysis of the Thickness and Electrical Conductivity of Thin Chalcogenide Semiconductor Films // Physics of the Solid State. 2017. Vol. 59, № 1. P. 180–183.
7. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М.: Гос. Изд-во физ.- мат. лит., 1961. 863 с.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЭЛАСТОМЕРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ВОЛЬФРАМА

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования особенностей структуры поверхностного слоя резины, модифицированной вольфрамом. В качестве объекта выбрана резина, приготовленная на основе каучуков Байпрена 611 и БНКС-28 АМН. Модифицирование осуществлялось вольфрамом методом магнетронного распыления. Были выполнены микроскопические исследования, химический анализ, а также рентгеноструктурный анализ поверхностного слоя. Было установлено, что приповерхностный слой содержит вольфрам и углерод в атомарном состоянии, также, возможно, карбид вольфрама, находящегося в двух фазовых состояниях.

Ключевые слова: модифицирование, вольфрам, магнетронное распыление, структура, микроскопические исследования, рентгеноструктурный анализ, карбид вольфрама, углерод.

Особенности процессов образования покрытий из тугоплавких металлов при использовании ионно-плазменных методов, в том числе метода магнетронного распыления, в первую очередь, связаны с механизмом интенсивной диссипации энергии. Можно выделить три стадии при формировании структуры покрытия. «На первой стадии идет процесс зародышеобразования, который из-за отсутствия соответствующих термодинамических условий не переходит в массовую кристаллизацию. Вторая стадия представляет собой формирование вокруг нанокристаллических зародышей аморфных кластеров, которые – на третьей стадии – объединяются в межкристаллитную фазу с образованием диссипативной структуры. Каждая из перечисленных стадий представляет собой сложный процесс» [1]. По этой причине представляет интерес изучить особенности структуры покрытий из тугоплавких металлов, нанесенных на специфическую поверхность, с точки зрения рельефа, каковой является поверхность резины.

Объектом исследования в настоящей работе являлась резина, модифицированная вольфрамом, нанесенным на поверхность резины методом магнетронного распыления. Использовали резину, приготовленную на основе двух каучуков:

– полихлоропреновый каучук Denka PS-40A или Байпрен 611, массовая часть (далее масс. ч.) которого составляет 70;

– БНКС-28 АМН, составляющий 30 масс. ч.

Данную резину применяют в промышленности для изготовления покровного слоя резинокордных оболочек и различных резинотехнических изделий (РТИ). Рецепт резины подробно описана в работе [2].

Вольфрам наносился методом магнетронного распыления на установке «ADVAVAC VSM-200» на поверхность резины после предварительной подготовки образцов (притирки) и ионной очистки. Температура подложки поддерживалась в интервале 80 – 90 °С. Оптимальный диапазон температур подложки определен экспериментально в работе [2]. В качестве мишени использовали вольфрам сверхвысокой чистоты (от 99 %), а в качестве технологического газа – аргон.

Микроскопические исследования особенностей структуры поверхностного слоя образцов проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа «JEOL JCM 5700»

производства компании JEOL (Япония), оснащенного энергодисперсионным спектрометром JED-2300.

На рис. 1 и 2 представлены микрофотографии поверхности резины без покрытия и с вольфрамовым покрытием для времени напыления 55 мин. при кратности увеличения 10000 [3]. Как видно из рисунков, формирование вольфрамового покрытия сопровождается образованием кластеров разной формы и размеров. Детальный анализ показывает, что сами кластеры состоят из более мелких образований – зерен.

Результаты химического анализа поверхностного слоя вольфрамового покрытия приведены в табл. 1. В начальной стадии напыления в поверхностном слое покрытия образуются элементы атомарного углерода, хлора и кислорода, образующиеся, по-видимому, как продукты распада макромолекул резиновой подложки. Их массовое соотношение по-разному изменяется в зависимости от длительности напыления: концентрация кислорода и хлора увеличивается, углерода - уменьшается. Атомарный вольфрам, выступающий как модификатор структуры покрытия, при увеличении длительности напыления не только накапливается, но и вступает в реакции с другими элементами, образуя химические соединения, в частности WO_3 .

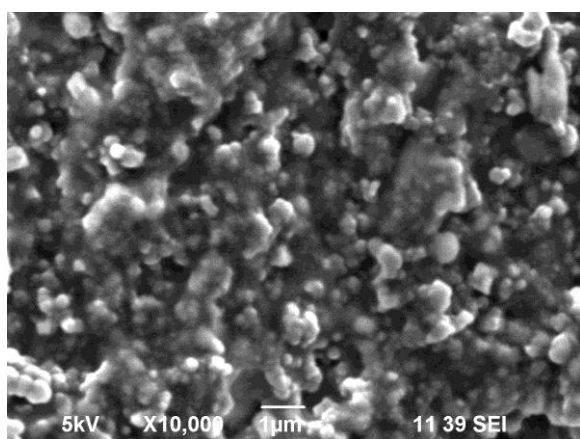


Рис.1. РЭМ – изображение поверхности резины без покрытия

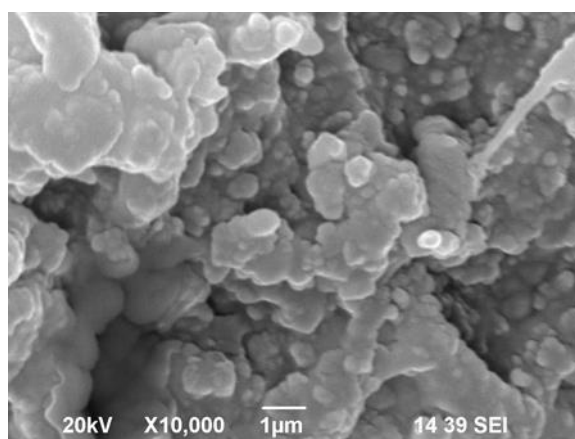


Рис.2. РЭМ – изображение покрытия на основе вольфрама для времени напыления 55 мин.

Таблица 1

Элементный состав поверхностного слоя до и после напыления

Время напыления, мин.	Элементный состав, масс. %				
	C	O	Cl	W	Соединение WO_3
0	88,32	1,18	8,80	-	-
5	26,17	1,72	31,31	36,13	-
55	27,01	14,57	7,23	50,22	63.3

Рентгенографические исследования, проведенные на дифрактометре XRD-7000S методом скользящего пучка, позволили более детально изучить особенности структуры вольфрамового покрытия. Рентгенограммы были получены в медном $K\alpha$ – излучении ($\lambda = 0.154$ нм) при углах скольжения $\alpha = 5 - 15^\circ$ и времени напыления покрытия от 1 до 55 мин. Пересчет углов скольжения α в брэгговские углы дифракции θ от отражающих плоскостей осуществляется по формуле:

$$2\theta = \alpha + \delta, \quad (1)$$

где δ – угол положения детектора относительно поверхности образца. Межплоскостные расстояния d/n определялись на основе закона Вульфа-Брэгга:

$$2d\sin\theta = k\lambda \quad (2)$$

Внешний вид дифрактограмм, полученных при облучении вольфрамового покрытия для времени напыления 1 и 10 минут, представлен на рис. 3 (угол скольжения $\alpha = 10^\circ$), для времени напыления 55 минут при углах скольжения от 5° до 15° – на рис. 4.

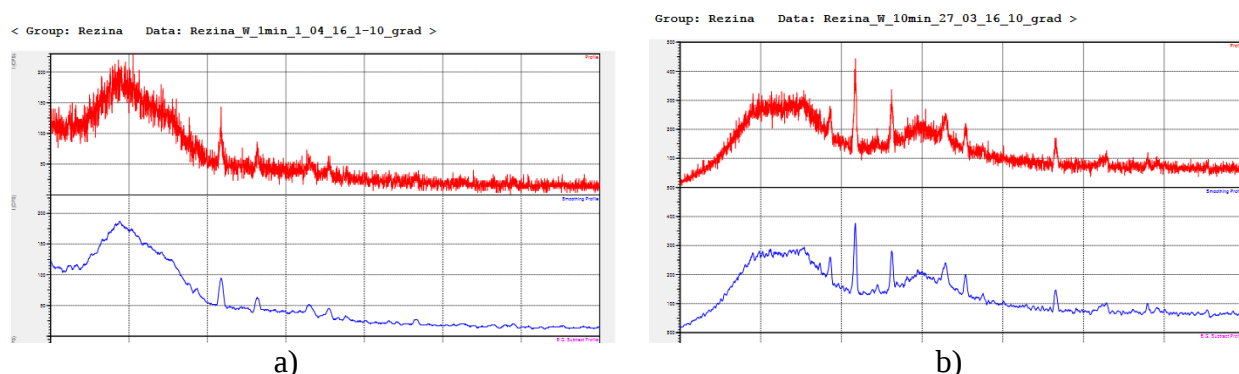


Рис. 3. Дифрактограммы поверхности вольфрамового покрытия при разном времени напыления: а) – 1 мин.; б) – 10 мин (угол скольжения $\alpha = 10^\circ$)

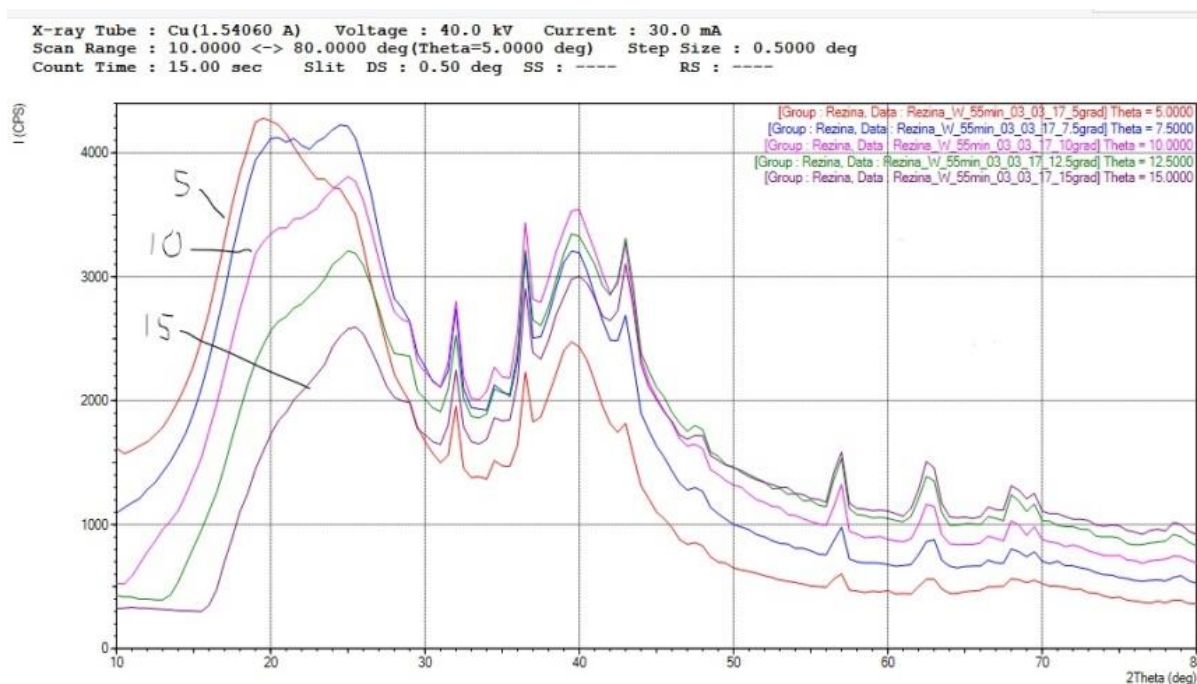


Рис. 4. Дифрактограммы поверхности вольфрамового покрытия при разном времени напыления: а) – 1 мин.; б) – 10 мин. (угол скольжения $\alpha = 5^\circ; 7,5^\circ; 10^\circ; 12,5^\circ; 15^\circ$).

Расчет межплоскостных расстояний d/n осуществляли по дифракционным максимумам для указанных углов скольжения. Полученные значения усредняли и сравнивали с табличными значениями [4] для предполагаемых фаз, присутствующих в приповерхностном слое: C, W, WC, WO_3 . Согласно расчетам перечисленные фазы предположительно присутствуют в покрытии, за исключением WO_3 . Идентификация WO_3 затруднена, так как все его рефлексы практически полностью попадают в область аморфных гало.

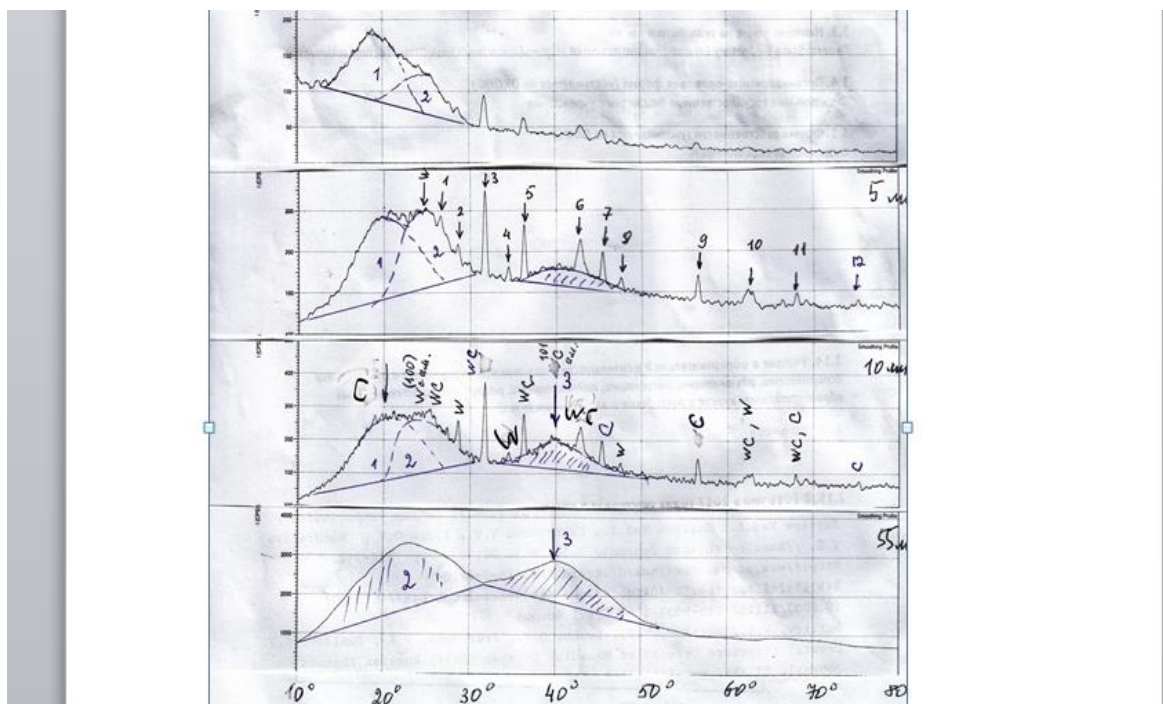


Рис. 5. Усредненный профиль дифрактограмм вольфрамовых покрытий для разного времени напыления при угле скольжения $\alpha = 10^\circ$

Структурно-фазовый анализ дифрактограмм покрытий, полученных при разном времени напыления, позволяет сделать ряд предварительных выводов. Так, для покрытия, напыляемого в течение 1 мин., в приповерхностном слое толщиной от 25 до 80 нм можно предположить наличие следующих фаз: C, W, WC, причем структура карбида вольфрама – аморфно-кристаллическая: дифракционные рефлексы соответствуют кристаллической фазе, а участки гало – аморфной фазе. При малом времени напыления в области малых брэгговских углов $2\theta \sim 20^\circ$ наблюдается аморфное гало I порядка от отражающих плоскостей (001). При увеличении длительности напыления вольфрамом в области углов дифракции $2\theta \sim 40^\circ$ появляется аморфное гало II порядка, соответствующее упорядочению дополнительно по плоскостям (101), площадь которого возрастает при увеличении времени напыления, по-видимому, за счет накопления карбида вольфрама. Присутствие участков аморфных гало на рентгенограммах может свидетельствовать о наличии в аморфной фазе WC кристаллических включений (типа кластеров) с очень деформированной решеткой (рисунки 3а, 5).

По результатам структурно-фазового анализа вольфрамового покрытия на резиновой основе можно сделать следующие выводы:

- время модифицирования оказывает существенное влияние на структуру приповерхностного слоя;
- образование карбида вольфрама в приповерхностном слое возможно по причине интенсивной диссипации энергии в процессе бомбардировки ионами W приповерхностного слоя, однако, вероятность процесса невелика из-за невысокой температуры подложки;
- карбид вольфрама должен находиться, как показывают расчеты, в поверхностном слое в двух состояниях – в кристаллическом в виде кластерных образований и аморфном, которое растет с ростом времени напыления;
- совпадение предполагаемых рефлексов, принадлежащих триоксида вольфрама, с областью наблюдения аморфной фазы не позволяет однозначно утверждать о наличии в поверхностном слое этого соединения.

Библиографический список

1. Еремин Е. Н., Юров В. М., Гученко С. А. [и др.]. Прогнозирование свойств нанокристаллических покрытий // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. Т.3, № 1. С. 190–195.
2. Целых Е. П. Влияние режимов ионно-плазменного напыления на структуру и свойства износостойких покрытий на резиновой подложке: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2015. 170 с.
3. Шеина А. В., Целых Е. П., Рогачев Е. А., Суриков Вал. И. Структурные особенности вольфрамового покрытия на резине // Актуальные проблемы современной науки : материалы VI Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием / ОмГТУ. Омск, 2017. С. 63–67. URL: https://omgtu.ru/general_information/faculties/radio_engineering_department/departament_of_physics_/File/2/APSN_2017.pdf
4. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М.: Госуд. изд-во физико-математической литературы, 1961. 864 с.

УДК 539.612

М.В. Мамонова, Е.С. Поворознюк

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

РАСЧЕТЫ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ И ИНТЕГРАЛОВ ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МУЛЬТИСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ $\text{Co}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}/\text{Cu}(100)$

Аннотация. В данной работе в рамках первопринципного подхода на наномасштабном уровне исследуются магнитные свойства мультислойной системы, состоящей из пленки сплава кобальта с никелем с концентрацией атомов никеля 50% на медной подложке с ориентацией поверхностной грани (100). Были рассчитаны значения полной энергии различных коллинеарных спиновых конфигураций, приведенный полный магнитный момент и магнитные моменты отдельных атомов Ni и Co в системе. Осуществлен расчет интегралов обменного взаимодействия для ближайших и следующих за ближайшими соседей в рамках классической модели Гейзенберга. Проведено исследование влияния эффектов решеточной релаксации на рассчитанные магнитные и энергетические характеристики. Полученные значения интегралов обменного взаимодействия могут быть применены при расчете температурной зависимости коэффициента магнитосопротивления.

Ключевые слова: первопринципные расчеты, ультратонкие пленки, обменный интеграл, мультислойные структуры, магнитные свойства.

Инновационные тенденции развития в современных исследованиях, в частности, в области магнетизма, сместились в направлении изучения наноразмерных структур, в том числе, тонких магнитных пленок. Благодаря колоссальному прорыву в развитии современной вычислительной техники и методам решения больших систем уравнений, при расчете из первых принципов (*ab initio*) стало возможным достигнуть точности, получаемой в эксперименте, что позволяет существенно снизить затраты ресурсов при изучении наноразмерных структур. Такой интерес к тонким магнитным пленкам вызван их большим практическим применением и наблюдаемыми в мультислойных структурах явлениями, такими как гигантское и туннельное магнитосопротивление [1-3].

В основе первопринципных расчетов электронной и кристаллической структуры магнитных материалов лежит спиновая теория функционала плотности и численное решение системы уравнений Кона-Шэма. Для осуществления первопринципных расчетов в данной работе применялся лицензионный программный пакет VASP (Vienna Ab-Initio Simulation Package) [4], предназначенный для моделирования атомно-молекулярных и электронно-ядерных систем методами квантовой механики с использованием набора псевдопотенциалов и метода проекционно-присоединенных волн (PAW). Интегрирование по зоне Бриллюэна выполнялось на сетке Монкхорста – Пака $8 \times 8 \times 1$. Энергия обрезания плоской волны составляла 350 эВ.

Целью данного исследования является расчет полной энергии системы, магнитных моментов атомов для различных спиновых конфигураций и интегралов обменного взаимодействия для ближайших и следующих за ближайшими соседями для трехслойной структуры $\text{Co}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}/\text{Cu}$.

Система моделировалась с помощью периодической 36-атомной суперячейки 2×2 (4 атома в слое), состоящей из трех атомарных слоев немагнитной подложки с ориентацией поверхностной грани (100) и трех атомарных слоев ферромагнитного сплава с обеих сторон пластины. Сплав образован на 50% из атомов Co и на 50% из атомов Ni, расположенных в шахматном порядке. Так как ультратонкая пленка повторяет структуру подложки, то атомная структура суперячейки для $\text{Co}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}/\text{Cu}$ соответствовала ГЦК структуре. А в качестве ее постоянной была выбрана постоянная решетки медной подложки $a = 3.6367(5)$, полученная нами в результате расчетов с учетом оптимизации параметров решетки [5].

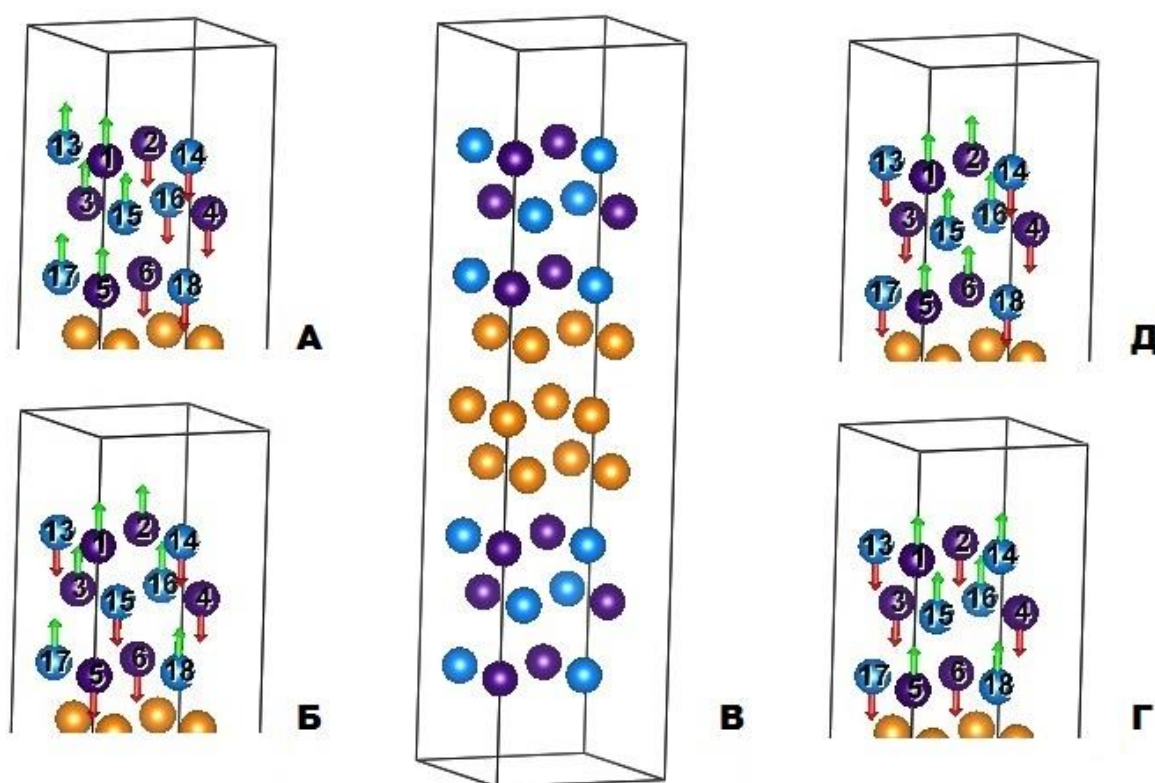


Рис. 1. Структура исследуемой системы $\text{Co}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}/\text{Cu}(100)$ и все спиновые конфигурации, для которых производились расчеты. А и Б - антиферромагнитные, В - ферромагнитное, Г и Д - ферримагнитные состояния. Фиолетовым цветом показаны атомы Co, голубым цветом - атомы Ni, оранжевым - атомы Cu. Стрелками обозначены направления магнитных моментов

В данной работе исследовались случаи коллинеарного магнетизма, где спины атомов ориентированы в одном направлении, перпендикулярном поверхности. Для нахождения основного магнитного состояния были рассмотрены несколько магнитных конфигураций: ферромагнитная (ФМ), две антиферромагнитные (АФ1 и АФ2) и две ферримагнитные конфигурации (М1 и М2). Схематическое изображение рассмотренных структур приведено на рис.1. В антиферромагнитных конфигурациях для каждого из компонентов сплава количество атомов со спином, направленным вверх и направленным вниз, совпадает, т.е суммарная намагниченность системы получается равной 0. В конфигурации АФ1 (рис. 1А) суммарная намагниченность равна нулю для каждого атомарного слоя, а в АФ2 (рис. 1Б) только для трехслойной пленки целиком. Порядок чередования знаков, соответствующий нумерации атомов, указанной на рис.1, приведен в табл.1. Знаком '+' обозначено направление проекции спина вверх, знаком '-' - направление вниз. В ферримагнитных состояниях (рис. 1Г и рис. 1Д), хотя общее количество атомов со спином, направленным вверх и направленным вниз, совпадает, суммарная намагниченность системы будет отличной от нуля, т.к магнитные моменты Co и Ni отличаются примерно в 2,5 раза.

Рассчитанные для ферромагнитной и ферримагнитных конфигураций значения магнитных моментов атомов сплава в i -м слое пленки μ_i и средний магнитный момент μ_{tot} , приходящийся на один атом, приведены в таблице 1. Расчеты показывают, что магнитные моменты атомов обоих типов принимают наибольшее значение в ферромагнитной конфигурации в атомном слое, наиболее удаленном от подложки ($i=3$). Учет поверхностной релаксации привел к перераспределению намагниченности между слоями. В ферромагнитной конфигурации около 2-5% для Co и 5-40% для Ni.

Таблица 1

Значения магнитных моментов атома пленки в i -ом слое μ_i и среднего μ_{tot}

Состояние	μ_3 $\mu_B/\text{ат}$		μ_2 $\mu_B/\text{ат}$		μ_1 $\mu_B/\text{ат}$		μ_{tot} $\mu_B/\text{ат}$
	Co	Ni	Co	Ni	Co	Ni	
Ферромагнитное без учета релаксации	1,877	0,695	1,659	0,467	1,675	0,655	1,213
Ферромагнитное с учетом релаксации	1,927	0,715	1,742	0,664	1,654	0,528	0,803
Ферримагнитное 1 без учета релаксации	1,816	0,298	1,719	0,487	1,623	0,177	0,172
Ферримагнитное 1 с учетом релаксации	1,891	0,689	1,701	0,655	1,661	0,451	0,783
Ферримагнитное 2 без учета релаксации	1,843	0,753	1,638	0,338	1,541	0,587	0,297
Ферримагнитное 2 с учетом релаксации	1,823	0,729	1,567	0,394	1,569	0,581	0,353

Таблица 2

Антиферромагнитные спиновые конфигурации, число пар атомов с антипараллельными спинами N_{ij}

анализ размагничивающих спинами N_i											
АФ состояние	Материал	ориентации спинов		N_{i1}	N_{i2}	N_{i1} Co-Co	N_{i2}	N_{i1} Ni-Ni	N_{i2}	N_{i1} Co-Ni	N_{i2}
1	Co	+	-	12	6	2	3	2	3	8	0
		+	-								
		+	-								
	Ni	+	-								
		+	-								
		+	-								
2	Co	+	+	19	6	2	3	2	3	15	0
		+	-								
		-	-								
	Ni	-	-								
		-	+								
		+	+								

Вклад в полную энергию, соответствующий обменному взаимодействию, описывался модельным гамильтонианом Гейзенберга (в расчете на одну ячейку)

$$H = -\frac{1}{2n} \sum_{i,j} J_{ij} (\vec{S}_i \vec{S}_j), \text{ где } n - \text{ число ячеек в пленке.} \quad (1)$$

Значения интегралов обменного взаимодействия для ближайших J_1 и следующих за ближайшими соседями J_2 могут быть получены на основе расчета разницы полных энергий системы для ферромагнитной E^Φ и антиферромагнитных спиновых конфигураций $E^{A\Phi}$:

$$N_{ij} J_j = \Delta E_i = E_i^{A\Phi} - E^\Phi, \quad (2)$$

где N_{ij} - число всех пар атомов в ячейке с антипараллельными спинами для i -го антиферромагнитного состояния для случая учета взаимодействия ближайших соседей ($j=1$) и для случая учета взаимодействия следующих за ближайшими соседями ($j=2$) - приведены в табл.2. Значения числа пар с антипараллельными спинами для каждого из сочетаний Co-Co, Ni-Ni и Co-Ni также приведены в табл. 2. Видно, что конфигурации АФ1 и АФ2 отличаются большим на 7 числом пар ближайших соседей атомов Co-Ni. Результаты первопринципных расчетов полных энергий системы для всех исследуемых спиновых конфигураций, а также обменных интегралов, представлены в таблице 3. Можно сделать вывод, что энергетически более выгодным является ферромагнитное состояние и первое ферромагнитное состояние с учетом релаксации. Значение обменного интеграла с учетом релаксации меняется незначительно - уменьшается на 7%. Из результатов расчета следует, что константа J_1 способствует антиферромагнитному упорядочению магнитных моментов ($J_1 < 0$), а константа J_2 способствует возникновению ферромагнитной конфигурации магнитных моментов, при этом ее величина в несколько раз больше, чем константа J_1 . Это обусловлено тем, что при шахматном расположении атомов компонентов сплава взаимодействие ближайших соседей в большей степени описывается взаимодействием атомов Co с атомами Ni, а взаимодействие следующих за ближайшими соседями описывается только взаимодействием атомов одного и того же типа.

Таблица 3

Рассчитанные значения обменных интегралов и полных энергий системы для ферромагнитной E^Φ и антиферромагнитных спиновых конфигураций $E^{A\Phi}$ и ферромагнитных E^M спиновых конфигураций

Релаксация	E^Φ эВ	$E_1^{A\Phi}$ эВ	$E_2^{A\Phi}$ эВ	E_1^M эВ	E_2^M эВ	J_1 10^{-14} эрг	J_2 10^{-14} эрг
Без учета	-185,022	-182,601	-183,084	-182,586	-182,586	-0,460	3,615
С учетом	-185,998	-183,745	-184,197	-186,171	-183,497	-0,431	3,369

Таким образом, в данной работе осуществлены первопринципные расчеты энергетических и магнитных характеристик для сплава $\text{Co}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}$ на немагнитной подложке с использованием специализированного программного пакета VASP. Был проведен расчет значений магнитных моментов атома для каждого слоя пленки и среднего магнитного момента. Был осуществлен первопринципный расчет значений интегралов J_1 и J_2 обменного взаимодействия между атомами пленок (ближайшими и следующими за ближайшими соседями), которые необходимы для применения в расчетах мультислойных магнитных структур с эффектами гигантского магнитосопротивления [6].

Библиографический список

1. Bass J., Pratt W. P. Current-perpendicular (CPP) magnetoresistance in magnetic metallic multilayers // J. Magn. Mater. 1999. Vol. 200. P. 274–289.
2. Nabiyouni G. Growth, characterization and magnetoresistive study of electrodeposited Ni/Cu and Co-Ni/Cu multilayers // J. Cryst. Growth. 2005. Vol. 275. P. 1259–1262.

3. Chappert C., Fert A., Nguyen van Dau F. The emergence of spin electronics in data storage // *Nature Mater.* 2007. Vol. 6. P. 813–822.

4. Kresse P. G., Furthmuller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set // *Phys. Rev. B.* 1996. Vol. 54. P. 11169.

5. Kondrashov R. A., Mamonova M. V., Povorozhuk E. S., Prudnikov V. V. First-principles investigations of the atomic structure and magnetic properties of Ni and Co films on Cu substrate // *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2017. Vol. 38, No. 5. P. 940–943.

6. Romanovskiy D. E., Mamonova M. V., Prudnikov V. V., Prudnikov P. V. Monte Carlo simulation of magnetic multilayered structures with the effects of giant magnetoresistance // *J. Siberian Federal University. Mathematics & Physics.* 2017. Vol. 10, No. 1. P. 65–70.

УДК 539.2

В.В. Прудников, А.А. Самошилова

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ МУЛЬТИСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ Co/Cu(100)/Co С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ НЕРАВНОВЕСНОГО ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования методом Монте-Карло магнитной мультислойной структуры, состоящей из тонких магнитных пленок и описываемой анизотропной моделью Гейзенберга. Определена зависимость параметра анизотропии в магнитных пленках от их толщины. Рассчитана температурная зависимость магнитосопротивления от толщины магнитных пленок, которая находится в хорошем соответствии с результатами эксперимента. Подтверждена гипотеза о том, что эффекты старения оказывают значительное влияние на магнитосопротивление структуры.

Ключевые слова: гигантское магнитное сопротивление, анизотропная модель Гейзенберга, мультислойные магнитные структуры, неравновесное поведение.

Последние десятилетия характеризуются повышенным интересом ученых к изучению свойств ультратонких магнитных пленок и структур на их основе. Исследование свойств ферромагнитных пленок способствует решению фундаментальных проблем физики магнитных явлений, развитию теории ферромагнетизма. Так, изучение тонких магнитных пленок расширило представления о физической природе анизотропии ферромагнетиков, позволило исследовать процессы перемангничивания, обнаружить новые физические явления в низкоразмерных системах. Способность предсказывать поведение и контролировать свойства таких пленок дает возможность решать фундаментальные проблемы физики магнитных явлений, открывать неизвестные ранее эффекты и успешно находить новые способы практического применения ультратонких пленок. Одной из важнейших областей применения пленок является спинтроника [1]. Новая эпоха в магнитных исследованиях и в промышленном применении магнитных материалов началась с эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМС) в периодических структурах, состоящих из тонких пленок ферромагнитного металла с прослойками из немагнитного металла (Рис. 1,а). Такие мультислойные системы демонстрируют резкое изменение их электрического сопротивления под влиянием различных внешних полей. Основная область применения данного эффекта –

датчики магнитного поля, головки для считывания информации с жёстких дисков, элементы магниторезистивной памяти, биосенсоры и др.

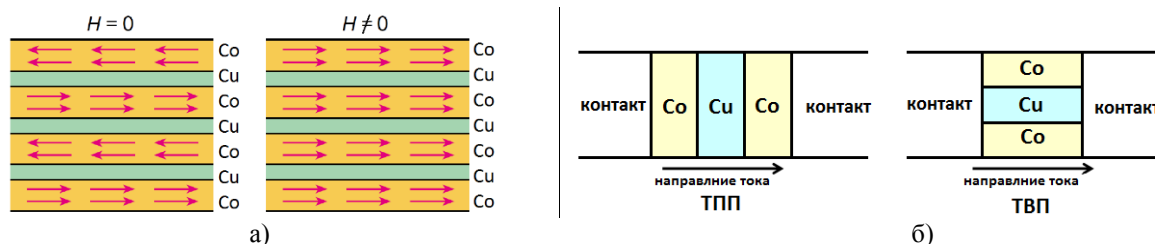


Рис. 1. Атомные слои Co и Cu в мультислойной структуре Co/Cu (а). Стрелки показывают направления магнитных моментов атомов Co. Схема ТВП и ТПП способов включения в электрическую цепь (б)

Заметим, что магнитную сверхрешетку можно включать в электрическую цепь двумя способами (рис. 1,б). При ТВП геометрии (ток в плоскости) электрический ток распространяется вдоль слоев сверхрешетки, а электроды расположены на одной стороне всей структуры. При ТПП геометрии (ток перпендикулярно плоскости) ток распространяется перпендикулярно слоям сверхрешетки, а электроды расположены по разные ее стороны. ТПП-геометрия характеризуется большими величинами ГМС, но и представляет большие сложности для технической реализации. На данном этапе для исследования был взят случай тока, перпендикулярного плоскости (ТПП).

Наномасштабная периодичность создает в магнитных мультислойных структурах эффекты сильной пространственной спиновой корреляции с медленной релаксационной динамикой намагниченности. Это приводит к реализации в структурах свойств старения при их эволюции из неравновесных начальных состояний [2,3]. Особенностью неравновесного поведения данных структур является тот факт, что, в отличие от объемных материалов, эффекты старения в них проявляются не только вблизи температуры Кюри T_c магнитного упорядочения в пленках, но и в широком температурном интервале с $T \leq T_c$.

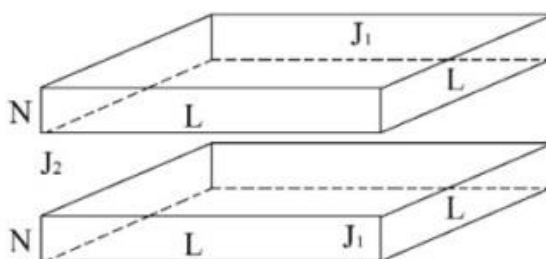


Рис. 2. Модель мультислойной структуры, состоящей из двух ферромагнитных пленок Co, разделенных пленкой немагнитного металла Cu. N , L – линейные размеры пленок. $J_{1,2}$ – обменные интегралы

Целью данной работы является расчет методом Монте-Карло коэффициента магнитосопротивления в магнитной структуре, состоящей из чередующихся слоев кобальта и меди (рис. 2), а также исследование влияния эффектов старения на поведение магнитосопротивления в низкотемпературной фазе.

Магнитные свойства ультратонких пленок Co при контакте с подложкой из немагнитного металла Cu(001) мы будем описывать анизотропной моделью Гейзенберга [4,5], задаваемой гамильтонианом:

$$H = -J_1 \sum_{\langle i,j \rangle} \{ (S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y) + (1 - \Delta(N)) S_i^z S_j^z \}, \quad (1)$$

где $\mathbf{S}_i = (S_i^x, S_i^y, S_i^z)$ – трехмерный единичный вектор спина, зафиксированный в i -ом узле ГЦК-решетки пленки кобальта, $J_1 > 0$ – обменный интеграл, характеризующий обменное взаимодействие ближайших спинов в пленке, $\Delta(N)$ – параметр, учитывающий эффективное влияние анизотропии, создаваемой кристаллическим полем подложки, на магнитные свойства пленки в зависимости от ее толщины N в единицах монослоев. На рис. 3 представлена зависимость $\Delta(N)$ для системы Co/Cu(100), рассчитанная на основе экспериментальных данных [6] по относительному изменению температуры ферромагнитного фазового перехода $T_c(N)$ в пленках кобальта (никеля) с толщиной N на медной подложке к $T_c(\infty)$ в объемных образцах кобальта (никеля).

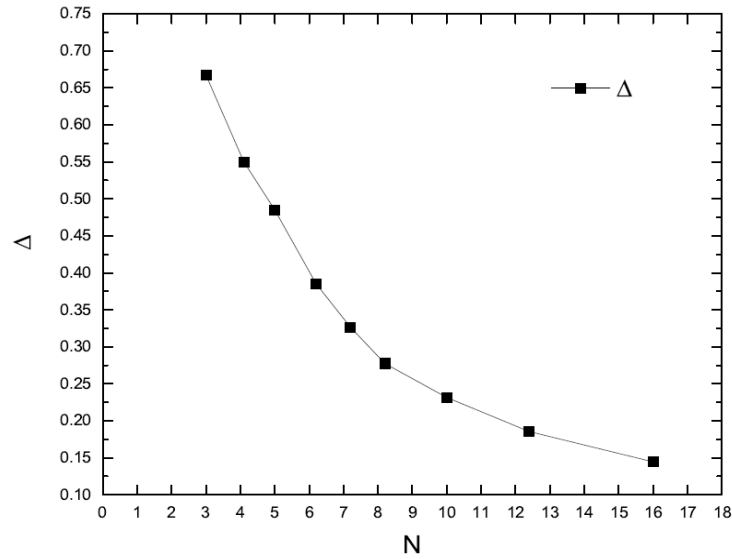


Рис. 3. Зависимость параметра анизотропии $\Delta(N)$ от толщины ферромагнитной пленки N для системы Co/Cu(100). Квадратам соответствуют экспериментальные данные [6]

Нами были рассмотрены мультислойные структуры, состоящие из двух ферромагнитных пленок, разделенных пленкой немагнитного металла (рис. 2). Моделирование проводилось для пленок с размерами $L \times L \times N$ и наложенными периодическими граничными условиями в плоскости пленки. Значение обменного интеграла, определяющего взаимодействие соседних спинов внутри ферромагнитной пленки с ГЦК-решеткой для Co/Cu(100)/Co, задавалось как $J_1/k_B T = 1$, взаимодействие между пленками – $J_2/J_1 = -0.3$. Температура T системы измеряется при этом в единицах обменного интеграла J_1/k_B . Вычислялись приведенные намагниченности пленок $m_{1,2}$ и их составляющие m_z и m_{xy} по отношению к xy - плоскости пленки.

Для мультислойных магнитных структур нами был рассчитан коэффициент магнитосопротивления, вводимый соотношением:

$$\delta = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P}, \quad (2)$$

где R_{AP} – сопротивление образца при антипараллельной ориентации намагниченностей ближайших ферромагнитных слоев, а R_P – сопротивление образца при их параллельной ориентации. Для структур с антиферромагнитной обменной связью ферромагнитных пленок R_{AP} характеризует сопротивление образца при отсутствии магнитного поля, а R_P – во внешнем магнитном поле, большем величины поля насыщения.

На первом этапе было проведено исследование температурной зависимости магнитосопротивления структуры как равновесной характеристики. Для этого систему приводили в состояние равновесия ($t \gg t_{\text{rel}}$, где t_{rel} – время релаксации). В работах [7,8] мы применили для расчета магнитосопротивления структуры в ТПП-геометрии двухтоковую модель Мотта для описания сопротивления различных каналов проводимости с сопротивлениями для двух групп электронов со спином вверх $R_{\uparrow}$ и вниз $R_{\downarrow}$ при прохождении ферромагнитной пленки. В итоге, коэффициент магнитосопротивления можно задать соотношением [7,8]:

$$\delta = \frac{(R_{\uparrow} - R_{\downarrow})^2}{(R_{\uparrow} + R_{\downarrow})^2} = \frac{(J_{\uparrow} - J_{\downarrow})^2}{(J_{\uparrow} + J_{\downarrow})^2}, \quad (3)$$

где $J_{\uparrow,\downarrow} = en_{\uparrow,\downarrow} \langle V_{\uparrow,\downarrow} \rangle$ – плотность тока. Здесь $n_{\uparrow,\downarrow}$ – концентрация электронов с проекциями спинов на ось z $+1/2$ и $-1/2$, $n = n_{\uparrow} + n_{\downarrow}$ – полная концентрация электронов, $\langle V_{\uparrow,\downarrow} \rangle$ – средние скорости электронов с соответствующими проекциями спинов. Концентрацию электронов можно выразить через намагниченность пленки $n_{\uparrow,\downarrow}/n = (1 \pm m)/2$, определяемую в процессе Монте-Карло моделирования ее магнитных свойств. Средние скорости электронов $\langle V_{\uparrow,\downarrow} \rangle$ можно выразить через подвижность электронов и напряженность внешнего электрического поля E , а затем через вероятность перескока электрона в единицу времени из i ячейки в соседнюю ячейку по направлению электрического поля [7].

На рис. 4 представлены результаты расчета температурной зависимости магнитосопротивления δ структуры Co/Cu(001)/Co с различными толщинами N пленок Co при задании шкалы температур через величину обменного интеграла $J_1 = 4.4 \cdot 10^{-14}$ эрг. Графики $\delta(T, N)$ демонстрируют близкий к линейному закону рост значений коэффициента магнитосопротивления с понижением температуры, а также последовательный рост магнитосопротивления с увеличением толщины N ферромагнитных пленок. Последний эффект обусловлен увеличением температуры $T_c(N)$ магнитного упорядочения в пленках с ростом N . Сопоставление рассчитанной зависимости $\delta(T, N)$ с экспериментальными данными для структуры с толщиной пленок в 1.2 нм [9], соответствующей $N=9$ ML, демонстрирует их хорошее согласие.

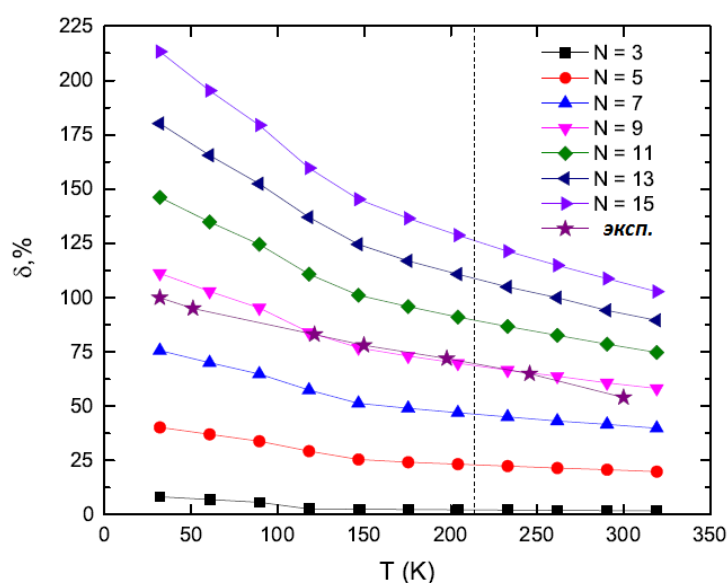


Рис. 4. Температурная зависимость коэффициента магнитосопротивления δ структуры Co/Cu(001)/Co при различных толщинах N пленок Co. Случай с $N=9$ сопоставлен с результатами эксперимента [9]. Пунктирная вертикальная линия соответствует температуре $T = 212$ К

На следующем этапе исследований было проведено моделирование неравновесного поведения мультислойной магнитной структуры при переводе ее из начального высокотемпературного состояния с намагниченностями пленок $m_0 \approx 0$ в магнитоупорядоченное состояние при температуре, например, $T_s = 2J_1/3k_B = 212 \text{ K} < T_c(N)$.

Была исследована двухвременная зависимость коэффициента магнитного сопротивления от времени ожидания t_w и времени наблюдения $t - t_w$ [2]. Время ожидания t_w характеризует время, прошедшее с момента приготовления образца до начала измерения его характеристик. В течение времени наблюдения $t - t_w \ll t_{rel}$ во временном поведении системы проявляется влияние начальных состояний системы. В качестве примера на рис. 5 представлена временная зависимость магнитосопротивления структуры Co/Cu(001)/Co с $N = 9 \text{ ML}$ для $t_w = 50, 100, 200, 400 \text{ mcs/s}$ при времени наблюдения в $16\,000 \text{ mcs/s}$. Видна зависимость магнитосопротивления от времени ожидания t_w – проявление эффектов старения, а также то, что на временах лишь порядка $15\,000 \text{ mcs/s}$ значения $\delta(t)$ выходят на плато с $\delta \approx 80 \%$, которое хорошо согласуется с равновесным значением δ , вычисленным при $T = 212 \text{ K}$.

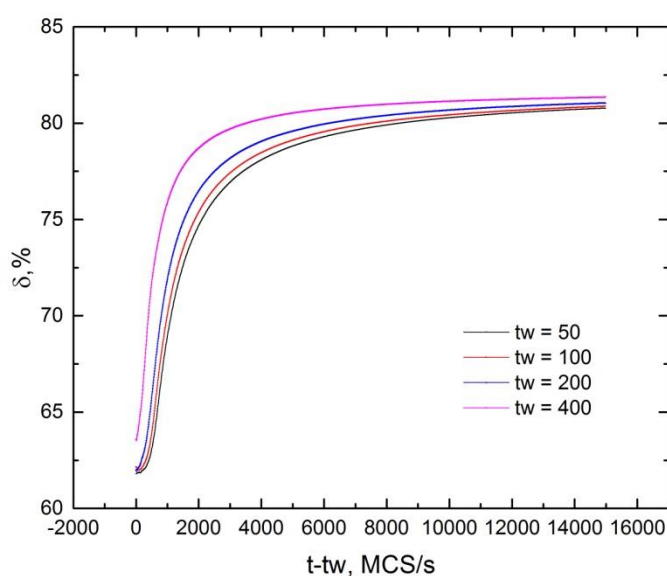


Рис. 5. Временная зависимость магнитосопротивления δ для Co/Cu(001)/Co с толщинами $N = 9$ пленок Co при температуре 212 K при временах ожидания $t_w = 50, 100, 200, 400 \text{ mcs/s}$

В представленной работе было проведено моделирование магнитной наноструктуры Co/Cu/Co с эффектом гигантского магнитосопротивления. Осуществлен расчет температурной зависимости коэффициента магнитосопротивления для различных толщин ферромагнитных пленок. Сопоставление рассчитанной зависимости магнитного сопротивления с экспериментальными данными для структуры с толщиной пленок в 1.2 nm [9], соответствующей $N=9 \text{ ML}$, демонстрирует их хорошее согласие.

При исследовании влияния неравновесного поведения магнитной наноструктуры, характеризующейся медленной динамикой в магнитоупорядоченной области, на величину магнитосопротивления впервые в его временной зависимости были обнаружены эффекты старения. Выявлено ослабление эффектов старения с ростом толщины ферромагнитных пленок N магнитной структуры. На примере структуры с толщиной пленок $N=9 \text{ ML}$ было показано, что лишь на временах наблюдения и ожидания, много больших времени релаксации структуры, временная зависимость величины магнитосопротивления выходит на плато, характеризующееся равновесными значениями. Существование данных

неравновесных эффектов, несомненно, надо учитывать при практическом использовании мультислойных магнитных структур в качестве приборов спинтроники с эффектом гигантского магнитного сопротивления.

Исследования поддержаны грантом РФФИ № 17-02-00279.

Библиографический список

1. Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // УФН. 2008. Т. 178, № 12. С. 1336–1348.
2. Прудников В. В., Прудников П. В., Мамонова М. В. Особенности неравновесного критического поведения модельных статистических систем и методы их описания // УФН. 2017. Т. 187. С. 817–855.
3. Прудников В. В., Прудников П. В., Пуртов А. Н., Мамонова М. В. Эффекты старения в неравновесном поведении мультислойных магнитных структур // Письма в ЖЭТФ. Т. 104. С. 797–805.
4. Прудников П. В., Прудников В. В., Медведева М. А. Размерные эффекты в ультратонких магнитных пленках // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100. С. 501–505.
5. Prudnikov P. V., Prudnikov V. V., Menshikova M. A., Piskunova N. I. Dimensionality crossover in critical behaviour of ultrathin ferromagnetic films // JMMM. 2015. Vol. 387. P. 77–82.
6. Huang F., Kief M. T., Mankey G. J., Willis R. F. Magnetism in the few-monolayers limit: A surface magneto-optic Kerr-effect study of the magnetic behavior of ultrathin films of Co, Ni, and Co-Ni alloys on Cu(100) and Cu(111) // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 49. No. 6. P. 3962–3971.
7. Прудников В. В., Прудников П. В., Романовский Д. Е. Моделирование методами Монте-Карло мультислойных магнитных структур и расчет коэффициента магнитосопротивления // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102. С. 759–765.
8. Prudnikov V. V., Prudnikov P. V., Romanovskiy D. E. Monte Carlo calculations of the magnetoresistance in magnetic multilayer structures with giant magnetoresistance effects // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. V. 49. P. 235002.
9. Bass J., Pratt W. P. Current-perpendicular (CPP) magnetoresistance in magnetic metallic multilayers // JMMM. 1999. V. 200. P. 274–289.

УДК 62-408.66

Е.А. Рогачев, Е.В. Якутова, М.А. Климовская, М.А. Зверев

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ РЕЗИНОВЫХ ОБРАЗЦОВ МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Аннотация. Задача исследования топографии поверхности образцов является важной при изучении свойств материалов. Связь структуры материала с его некоторыми физическими свойствами делает актуальной проблему ее количественного анализа. Успешно решать такую задачу позволяют методы сканирующей зондовой микроскопии. В статье представлены результаты исследования топографии поверхности эластомеров методом сканирующей зондовой микроскопии. Рассмотрены конструкционные особенности учебного зондового микроскопа NanoEducator и профессионального микроскопа NTEGRA

производства ЗАО НТ-МДТ. Показано преимущество использования микроскопа NanoEducator перед микроскопом NTEGRA в исследовании образцов с крупным рельефом.

Ключевые слова: сканирующая зондовая микроскопия, топография поверхности, эластомеры, NanoEducator, NTEGRA.

Метод сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) является одним из перспективнейших методов исследования физических свойств материалов. Данный метод исследования является относительно молодым, так как первый микроскоп, работающий в режиме сканирующей туннельной микроскопии, был представлен лишь в 1981 году. Этот микроскоп показал возможность получения изображения поверхности с атомарным пространственным разрешением. Дальнейшее бурное развитие данного метода привело к появлению различных видов методик исследования, позволяющих получить информацию о разных физических свойствах материалов. Одной из ключевых особенностей метода является получение трёхмерного изображения поверхности и её физических характеристик.

В настоящее время на рынке высокотехнологичного оборудования присутствует много компаний, как отечественных, так и зарубежных. Среди отечественных компаний выгодно выделяется компания ЗАО НТ-МДТ и ее учебные микроскопы NanoEducator и научные микроскопы NTEGRA.

Рассмотрим конструкционные особенности СЗМ NTEGRA [1]. Зондовый микроскоп "NTEGRA" состоит из:

- 1) метрологического пьезокерамического сканера с системой обратной связи на емкостных сенсорах;
- 2) цифрового СЗМ контроллера обратной связи для работы с расширенным набором методик;
- 3) модуля активной виброизоляции;
- 4) внешней оптической системы, включающей в себя оптический микроскоп и модуль видеомикроскопа.

Для получения СЗМ-изображения осуществляют специальным образом организованный процесс сканирования образца.

Сканирование осуществляется по строкам за счет строчечной и кадровой развертки, значение регистрируемого параметра на исполнительном элементе меняется пропорционально профилю поверхности. Полученные значения обрабатываются компьютером, по полученным данным строятся изображения поверхности и проводится количественный ее анализ.

Для регистрации силового взаимодействия зонда и образца используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль (кантилевер) с острием зонда на конце (рис. 1).



Рис.1 Система зонд-образец

В СЗМ регистрируются изменения силы притяжения зонда к поверхности. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Колебания

чувствительной к деформации консоли определяются ее резонансной частотой и межатомными силами. Отклонение консоли регистрируется с помощью лазерного луча, отражающегося от ее поверхности на фотодетектор. По изменению показаний фотодиода можно судить о рельефе исследуемого объекта. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью.

Помимо исследования рельефа поверхности образца, зондовый микроскоп "NTEGRA" позволяет изучить его различные свойства: механические, электрические, магнитные, оптические. Таким образом, ключевой особенностью данного микроскопа является применение зондового датчика консольного типа.

Для сравнения рассмотрим особенности конструкции учебного микроскопа NanoEducator [1]. Сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator состоит из следующих основных компонентов:

- 1) пьезокерамический зондовый датчик;
- 2) оптический микроскоп (веб-камера);
- 3) пьезоэлектрический двигатель x, y, z для прецизионного перемещения зонда относительно поверхности исследуемого образца;
- 4) генератор развертки, подающий напряжения на пьезодрайверы x и y, обеспечивающие сканирование зонда в горизонтальной плоскости;
- 5) электронный датчик, детектирующий величину локального взаимодействия между зондом и образцом;
- 6) компаратор, сравнивающий текущий сигнал в цепи датчика;
- 7) электронная цепь обратной связи, управляющая положением зонда по оси z.

Работа сканера микроскопа такая же, как и у микроскопа NTEGRA.

В качестве детектора в NanoEducator используется универсальный датчик туннельного тока и модуляционного силового взаимодействия. Датчик представляет собой пьезокерамическую трубку. На внутреннюю поверхность трубки нанесен проводящий электрод. На внешнюю поверхность трубки нанесены два электрически изолированных полуцилиндрических электрода. К свободному концу трубки прикреплена вольфрамовая проволока. Свободный конец проволоки, используемой в качестве зонда, заточен электрохимически, радиус закругления имеет величину менее нм. Зонд имеет электрический контакт с внутренним электродом трубки, соединенным с заземленным корпусом прибора (рис. 2).

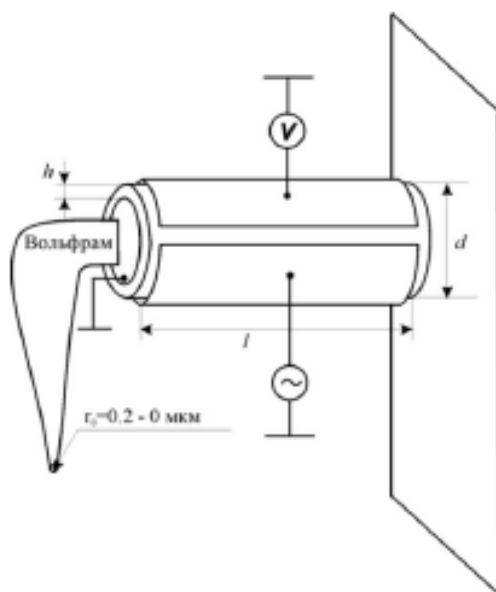


Рис. 2. Конструкция универсального датчика прибора NanoEducator

В данном микроскопе основной методикой исследования является сканирование в режиме полуконтакта. В данном режиме зонд находится в непрерывном колебательном движении с частотой, равной резонансной. Колебание задает генератор синусоидальных сигналов. При приближении зонда к образцу амплитуда его колебаний меняется за счет взаимодействия вольфрамовой нити с участками поверхности образца. Образующееся на пьезотрубке напряжение регистрируется осциллографом, так же как и генератор, находящимся в контроллере микроскопа. Этот сигнал и является детектируемым, с помощью которого и происходит построение изображения поверхности образца.

Размеры и форма зондового датчика микроскопа NanoEducator дают ему преимущественные возможности в сравнении с кантилевером микроскопа NTEGRA. Так, изгиб зондового датчика микроскопа NanoEducator возможен на большую величину, в сравнении с изгибом кантилевера. Это позволяет изучать микрорельеф образцов с размером микронеровностей до 20 мкм. Длина вольфрамовой проволоки позволяет проводить исследования поверхностей с большим радиусом искривления, тогда когда планка кантилевера может цепляться за части образца, не позволяя острию вступать во взаимодействие с поверхностью.

В каких же случаях указанные выше преимущества играют ключевую роль?

Во многих деталях машин и механизмов в качестве уплотнительных элементов применяют резиновые кольца. Для поверхностей некоторых резиновых изделий характерен относительно крупный микрорельеф.

Существует метод поверхностного модифицирования свойств материалов. Данный метод позволяет, не меняя кардинально технологию производства изделий и применяемый при их изготовлении материал, существенно повысить их эксплуатационные характеристики. Так, при нанесении на резиновую подложку пленки из молибдена возможно понизить истираемость резины. В работе [2] авторами было проведено исследование по изучению влияния процесса модифицирования на триботехнические параметры резинотехнических изделий, такие как износостойкость и коэффициент трения. В качестве объекта исследования использовали резину на основе каучуков БНКС-28 АМН и Денка PS-40А, а в качестве модификаторов — тугоплавкие металлы: молибден, вольфрам и тантал. Для формирования покрытий на поверхности резиновых образцов использовали установку магнетронного ионно-плазменного напыления ADVAVAC VSM-200.

В результате исследования было показано, что нанесение покрытия из молибдена приводит к снижению истираемости по металлическому диску в $2 \div 3$ раза, коэффициент трения снизился в $1,5 \div 1,8$ раза по сравнению с исходной резиной.

Кроме того, авторами ставилась задача установить связь между структурой поверхности и ее износостойкостью. Для ее решения применялся метод растровой электронной микроскопии, однако основным недостатком этого метода, в сравнении с методом СЗМ, является отсутствие информации о высоте микронеровностей.

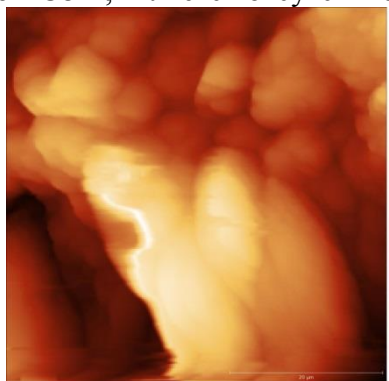


Рис. 3а. 2D изображение топографии поверхности резины после истирания

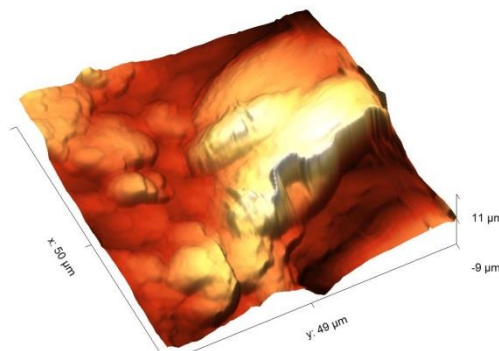


Рис. 3б. 3D изображение топографии поверхности резины после истирания

Для решения этой проблемы нами были предприняты попытки исследования топографии поверхности резиновых образцов с помощью микроскопов NTEGRA и NanoEducator. В результате получить топографию поверхности эластомера с помощью микроскопа NTEGRA удалось лишь на незначительно малом участке поверхности (5x5 мкм), что не дает возможности проводить качественный и количественный ее анализ. Зато на микроскопе NanoEducator удалось увеличить размер сканируемой области до 50 мкм. Результаты представлены на рис. 3.

Таким образом, в результате проделанной работы была показана перспективность метода сканирующей зондовой микроскопии в вопросе изучения топографии поверхности и количественного ее анализа. Выявлены преимущества и недостатки сканирующих зондовых микроскопов NTEGRA и NanoEducator. Установлено, что для исследования топографии поверхности эластомеров, для которых характерен относительно крупный рельеф (перепады высот в которых достигают до 50 мкм), целесообразно применять микроскоп NanoEducator.

Библиографический список

1. NT-MDT Spectrum Instruments. Теоретические основы СЗМ. [Электронный ресурс] 2015 - 2018, NT-MDT SI. URL: <https://www.ntmdt-si.ru/resources/spm-theory> (дата обращения: 03.03.2018).
2. Целых Е. П., Полонянкин Д. А., Рогачев Е. А., Суриков В. И. Улучшение триботехнических свойств резин путем поверхностного модифицирования угоплавками металлами // Омский научный вестник. Серия Приборы, машины и технологии. 2015. № 1 (137). С. 97–100.
3. Surikov V. I., Polonyankin D. A., Tselykh E. P., Rogachev E. A. Study the effect of surface magnetron sputtering modification on operating properties of rubber // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2014 / IEEE Conference publications. P. 1–6. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005696

УДК 621.793.79

П.А. Рябинкина, Е.Г. Бушуева, И.Н. Градусов, А.А. Никулина

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ С КАРБИДОМ НИОБИЯ, СФОРМИРОВАННЫХ НА СТАЛИ 12Х18Н9Т МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ

Аннотация. Методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки на стали 12Х18Н9Т были сформированы покрытия, модифицированные карбидом ниобия. По результатам исследований микроструктуры было выявлено, что формируемые покрытия не имеют дефектов, при проведении дюрометрических исследований и испытаний на износостойкость было определено, что нанесение покрытия способствует повышению твердости и износостойкости исходного материала в 2 раза.

Ключевые слова: покрытия, электронно-лучевая обработка, стали, структура, износостойкость, микротвердость.

Аустенитная сталь используется для изготовления различных деталей, узлов машин, оборудования для металлообработки и инструментов. Основным фактором, влияющим на

эксплуатационные характеристики изделий, являются свойства поверхностного слоя, так как при воздействии внешней среды, приложенных усилий поверхностный слой материала подвергается коррозии, а также износу, что приводит к зарождению и развитию трещин. Ввиду этого возникает необходимость ремонта или замены деталей [1]. Добиться увеличения срока службы изделий, эксплуатируемых в условиях износа, коррозионной среды можно путем формирования поверхностных слоев, обладающих требуемым комплексом свойств [2, 3]. В настоящее время активно используется химико-термическая обработка (ХТО), в ходе которой поверхностные слои материала насыщаются углеродом, азотом, бором и т.д. Основным недостатком ХТО является небольшая толщина формируемого защитного слоя, частицы которого выкрашиваются при ударно-абразивных нагрузках, в слое образуются сколы. Также для осуществления диффузионного насыщения необходимо подвергать изделие выдержке при высоких температурах в течение длительного времени, что с экономической точки зрения не во всех случаях является целесообразным.

Одним из наиболее перспективных методов нанесения покрытий является метод вневакуумной электронно-лучевой наплавки, осуществляемой с использованием промышленного ускорителя электронов, позволяющего выводить электронный пучок в атмосферу. Преимущества данного метода заключаются в отсутствии необходимости использования вакуумных камер, благодаря чему значительно сокращается время подготовительных операций перед непосредственно наплавкой, покрытия, полученные данным методом, имеют толщину до нескольких мм, обладают высокой адгезией, также возможна обработка габаритных изделий [4, 5].

Промышленные электронные ускорители типа ЭЛВ-6 разрабатываются и изготавливаются сотрудниками Института ядерной физики им. Будкера СО РАН. Данные ускорители, помимо отмеченных выше особенностей, характеризуются высоким коэффициентом полезного действия, мощность ускорителей достигает 100 кВт. Обработка изделий осуществляется в течение нескольких минут.

Целью данной работы было формирование износостойкого покрытия на основе карбида ниобия, который обладает высокой прочностью и твердостью, поэтому модифицирование поверхностного слоя материала с добавкой этого соединения позволит значительно увеличить поверхностную прочность и сопротивление изнашиванию. Основной задачей исследования являлось повышение износостойкости поверхностных слоев хромоникелевой аустенитной стали за счет формирования покрытия с равномерно распределенными частицами упрочняющей фазы.

В качестве материала основы была использована сталь 12Х18Н9Т, характеризующаяся коррозионной стойкостью, технологичностью, дешевизной, однако обладающая низкими показателями износостойкости. Для наплавки использовали смесь порошков карбида ниобия (40 вес. % от общей массы порошка) и флюса MgF_2 (50 вес. %), в качестве смачивающего компонента был использован порошок железа (железо восстановленное марка ЧТУ 6-09-2227-81 10 вес. %).

Сила тока при наплавке образцов варьировалась от 22 до 24 мА, энергия пучка электронов 1,4 МэВ, скорость поступательного движения образца под пучком достигала 10 мм/с, амплитуда сканирования – 50 мм. Режимы были выбраны на основе предварительно проведенных исследований и работ, ранее выполненных сотрудниками Института ядерной физики им. Будкера СО РАН.

Полученные образцы исследовались с использованием растрового электронного микроскопа *Carl Zeiss EVO 50 XVP*. Измерения микротвердости проводили на микротвердометре для проведения испытаний по Виккерсу *Model 402MVD*.

По результатам металлографических исследований было выявлено, что полученные покрытия не имеют крупных пор и трещин, увеличение силы тока способствует увеличению толщины получаемого покрытия. Максимальная толщина полученного покрытия составляет

1,7 мм. На рис. 1 представлен пример формируемой структуры покрытия, наплавка которого осуществлялась при силе тока 24 мА, видно, что в структуре присутствуют скопления частиц. Результаты рентгенофазового анализа подтвердили, что данные частицы представляют собой карбид ниобия, а окружающая матрица является γ -Fe (рис. 2).

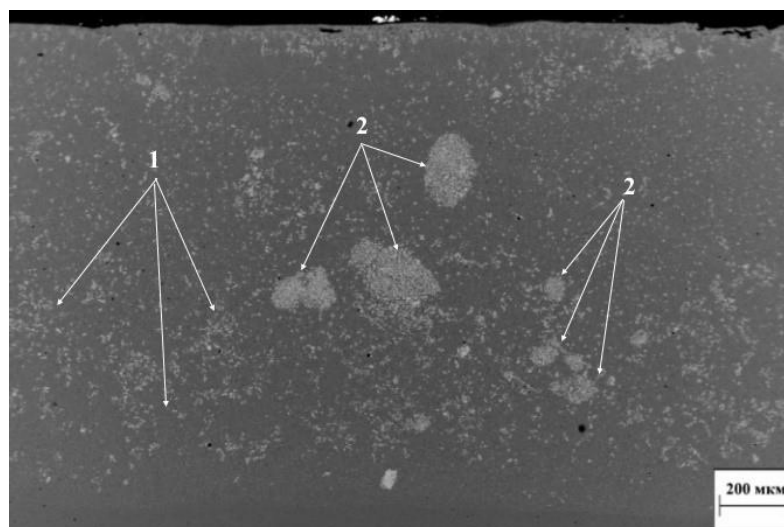


Рис. 1. Общий вид покрытия на основе карбида ниобия, полученного при токе пучка 24 мА:
1 – равномерно распределенные карбиды, 2 – агломераты карбидов

По результатам дюрOMETрических исследований было выявлено, что величина микротвердости покрытия составляет порядка 300-550 HV, что в 1,5-2,5 раза превышает твердость основного металла (рис. 3). Скачки показателей микротвердости объясняются неравномерным распределением частиц карбида ниобия, что может быть следствием недостаточного перемешивания, ввиду чего карбиды остались в агломератах. Необходимо провести более тщательное перемешивание приготавливаемой шихты, а для повышения твердости увеличить долю модифицирующего порошка.

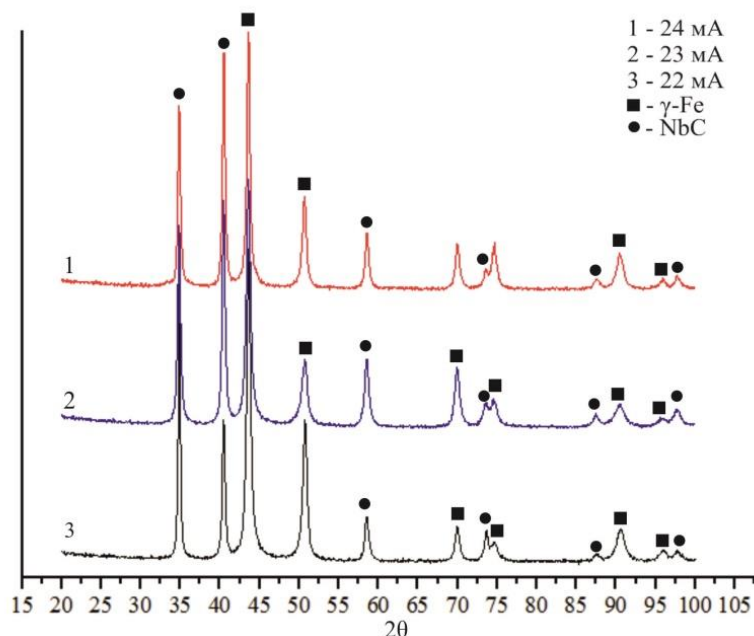


Рис. 2. Рентгенограммы образцов, сформированных по технологии
вневакуумной электронно-лучевой наплавки

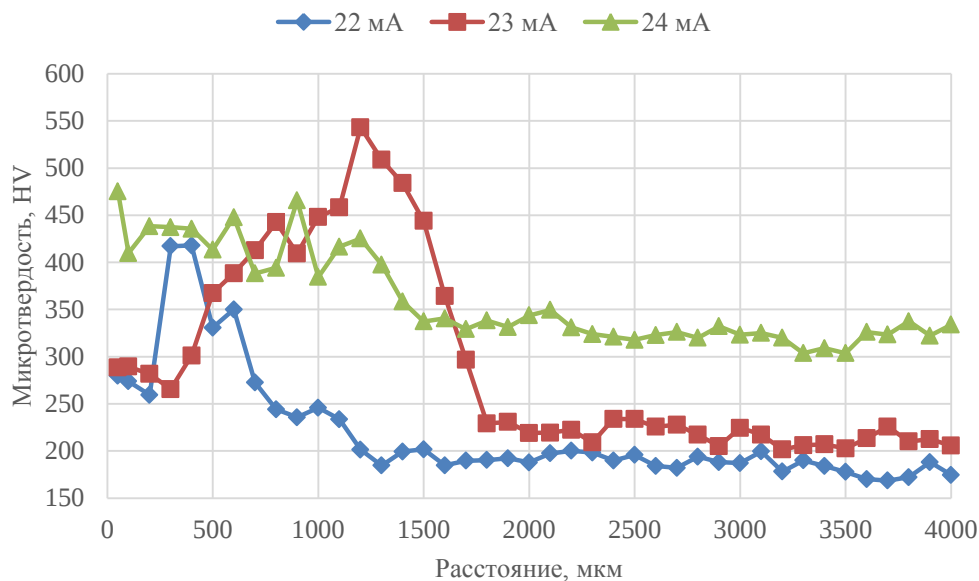


Рис. 3. Микротвердость материалов с наплавленным покрытием

При оценке износостойкости полученных материалов в условиях действия закрепленных частиц абразива (ГОСТ 17367-71) было обнаружено, что износостойкость материала с покрытием увеличивается в 1,5-2 раза по сравнению с исходной сталью. Данное повышение износостойкости может быть объяснено наличием в структуре покрытия карбидов ниобия, распределенных и удерживаемых в вязкой матрице, что способствует высокому сопротивлению изнашиванию при трении.

Таким образом, методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки были сформированы покрытия 1,5-1,7 мм на хромоникелевой аустенитной стали, способствующие повышению износостойкости и твердости материала в 2 раза.

В дальнейшем планируется провести тонкие микроструктурные исследования, а также испытания на износостойкость в условиях гидро- и газобразивного изнашивания.

Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013).

Библиографический список

1. Тушинский Л. И., Плохов А. В., Токарев О. А. Методы исследования материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий. М: Мир. 2004. 384 с.
2. Kornienko E. E., Nikulina A. A., Lapushkina E. U. [и др.]. Structural research of boron carbide coatings received by plasma spraying // INTERFINISH-SERIA 2014 International Conference on Surface Engineering for Research and Industrial Applications. Новосибирск, 2014. С. 68.
3. Teplykh A., Bataev A., Drobyaz E. [и др.]. Boride coatings structure and properties, produced by atmospheric electron-beam cladding // Advanced Materials Research. 2011. Т. 287-290. С. 26-31.
4. Голковский М. Г. Закалка и наплавка релятивистским электронным пучком вне вакуума. LAP LAMBERT Academic Publishing, Германия, 2007. 325 с.
5. Полетика И. М., Голковский М. Г., Перовская М. В., Крылова Т. А. Формирование покрытий двойного назначения методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки // Физическая мезомеханика. Специальный выпуск. 2006. Т. 9. С. 177-180.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПАР ТРЕНИЯ

Аннотация. Магнетронное напыление является новой технологией для получения покрытий, повышающих износостойкость рабочих поверхностей деталей пар трения. В данной работе рассмотрена физика процесса магнетронного напыления, проведен обзор оборудования для реализации данной технологии. Проведен анализ работ отечественных и зарубежных авторов, в которых отражены вопросы применения магнетронного напыления для повышения износостойкости поверхностей деталей и режущего инструмента. В результате анализа определены дальнейшие пути исследования проблемы повышения износостойкости с помощью магнетронного напыления.

Ключевые слова: износостойкость, качество поверхности, магнетронное напыление, магнетронная распылительная система, пара трения, многослойное покрытие.

Как известно, основной причиной выхода из строя машин (до 85 %) является износ рабочих поверхностей деталей пар трения. Исследованиями таких ученых, как И. В. Крагельский, Д. Н. Гаркунов, Ю. Г. Шнейдер, установлено, что наибольшее влияние на износ оказывает качество поверхностей деталей. Поэтому задача повышения качества поверхностного слоя, улучшения его антифрикционных свойств всегда является актуальной [1].

Параметры качества поверхности, в свою очередь, зависят от метода обработки поверхности. Применяемые при производстве деталей методы обработки резанием (точение, шлифование) не могут обеспечить необходимые триботехнические свойства поверхности, поэтому для решения такой задачи применяются различные методы модифицирования поверхностного слоя. К таким методам относятся технологии термической обработки (нагрев, закалка, отпуск), благодаря которым достигается твердость поверхностного слоя до значений HRC 45-60 [2]. Применяют методы химико-термической обработки (цементация, азотирование, цианирование). Например, при ионно-лучевом азотировании микротвердость поверхностного слоя легированных сталей может достигать HV 1200 – 1800 при многократном увеличении износостойкости [3].

Находят применение и технологии поверхностно-пластического деформирования (ППД): упрочняющее накатывание и раскатывание, дробеструйное упрочнение, ультразвуковое упрочнение, центробежная обработка, вибронакатывание [4 – 5].

Довольно эффективной является технология ударно-акустической обработки, разработанная д.т.н., профессором А. В. Телевным, где реализуется внедрение твердого смазочного покрытия (обычно им является суспензия дисульфида молибдена MoS_2) в поверхностный слой рабочей поверхности детали под действием ультразвукового инструмента. В результате микротвердость поверхности после обработки повышается в 1,5–2 раза, улучшается шероховатость поверхности и улучшаются триботехнические свойства поверхностного слоя [6].

Кроме методов механического упрочнения поверхностей применяются и технологии нанесения различных покрытий, материалами которых могут быть полимеры, твердые смазки, металлы. Такие покрытия наносятся плазменным напылением, детонацией, электрофорезом, химическим осаждением и т.д. Одним из современных методов нанесения покрытий на основе дисульфида молибдена или меди является технология магнетронного

напыления, которую можно применять как отдельно [7 – 8], так и в комбинации, например, с методами химико-термической обработки [9].

Магнетронное напыление – технология нанесения тонких пленок на подложку с помощью катодного распыления мишени в плазме магнетронного разряда – диодного заряда в скрещенных полях. Устройства, предназначенные для реализации данной технологии, называются магнетронными распылительными системами или магнетронами.

Технология магнетронного напыления основана на образовании над поверхностью катода кольцеобразной плазмы, возникающей при столкновении электронов с молекулами газа (чаще всего аргона). Источником распыляемого материала является мишень устройства. Положительные ионы, образующиеся в разряде, ускоряются в направлении катода – мишени, бомбардируют его поверхность, выбивая из неё частицы материала. Тяжелый ион газа, (рис. 1) (белый шарик) разгоняется в электрическом поле и выбивает ион материала (красный шарик). Ионы выбитого материала осаживаются на подложке, образуя тонкую пленку. Покидающие поверхность мишени частицы частично рассеиваются на молекулах остаточных газов или оседают на стенках рабочей камеры.

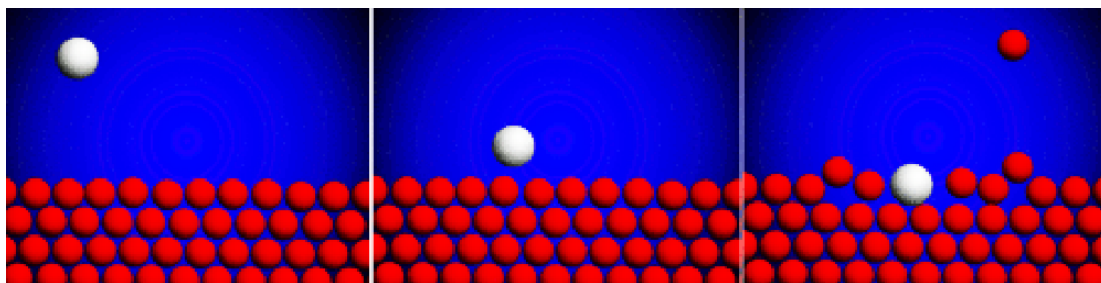


Рис. 1. Схема процесса магнетронного напыления

При столкновении ионов с поверхностью мишени момент импульса передается материалу, возникает каскад столкновений (рис. 2). После многократных столкновений импульс доходит до атома, который находится на поверхности, и происходит отрыв атома от поверхности и его осаждение на подложке [10].

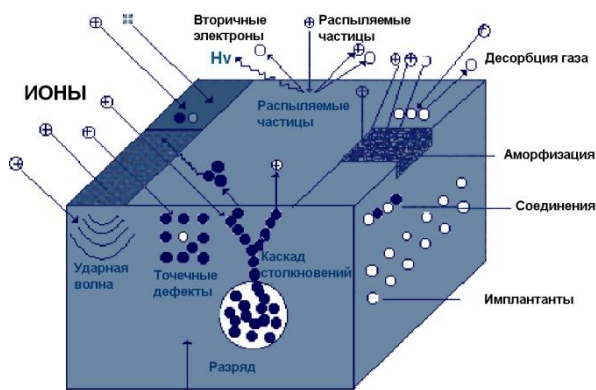


Рис. 2. Схема взаимодействия ионов с поверхностью мишени

Одним из основных показателей, характеризующих эффективность данного процесса, является среднее число выбитых атомов на один падающий ион аргона. Данный параметр зависит от угла падения иона, массы испаряемого материала, энергии и массы иона. Для эффективной ионизации аргона распыляемый материал (мишень) размещают на магните. В результате эмиссионные электроны, вращающиеся вокруг магнитных силовых линий, локализируются в пространстве и многократно сталкиваются с атомами аргона, превращая их в ионы.

Магнетронное распыление позволяет получать высокую плотность ионного тока, а значит, и высокие скорости распыления при относительно низких давлениях порядка 0,1 Па и ниже.

Несомненным достоинством технологии магнетронного напыления является возможность получения покрытий практически из любых металлов и сплавов. В зависимости от состава рабочей среды можно получать пленки карбидов, нитридов, оксидов практически любых материалов. Для обеспечения стабильности процесса необходимо поддерживать силу тока разряда с высокой точностью. В качестве рабочей среды при магнетронном распылении используют смесь инертного и реакционных газов с подбором парциальных давлений компонентов газовой смеси при постоянном общем давлении, поддерживаемом с высокой точностью. Это, в свою очередь, требует оснащение вакуумных установок насосами, обеспечивающими постоянную скорость откачки в рабочем диапазоне давлений. Состав получаемых соединений (оксидов, карбидов, нитридов) зависит от чистоты применяемых газов и распыляемых материалов, поэтому требуются сложные системы откачки газов и высокочистые материалы для распыления.

К преимуществам данной технологии можно также отнести высокую равномерность покрытий, возможность нанесения покрытий сложного состава на большие площади, хорошую однородность покрытия, хорошую управляемость процесса.

Однако у метода магнетронного напыления имеются и свои недостатки, к которым относятся: низкая производительность процесса, трудности в согласовании источника питания магнетрона с нагрузкой при работе на высоких частотах, нестабильность рабочих параметров магнетронной распылительной системы из-за дуговых разрядов, довольно высокая стоимость оборудования.

На рис. 3 представлена схема магнетронной распылительной системы. При подаче постоянного напряжения между катодом, которым является мишень, имеющая отрицательный потенциал, и анодом возникает электрическое поле и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Из-за наличия замкнутого магнитного поля вблизи поверхности мишени появляется возможность сконцентрировать разряд около поверхности. Электроны, которые выбиваются с поверхности катода, захватываются магнитным полем и совершают движение по сложной траектории у поверхности мишени.

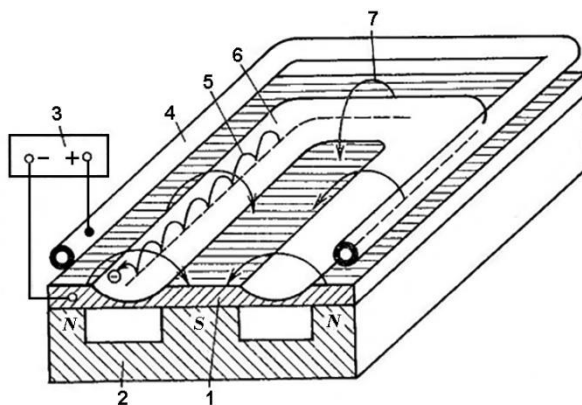


Рис. 3. Схема магнетронной распылительной системы с плоским катодом:
1 – катод-мишень; 2 – магнитная система; 3 – источник питания; 4 – анод; 5 – траектория движения электрона; 6 – зона распыления; 7 – силовая линия магнитного поля

Для реализации технологии магнетронного напыления за рубежом и в России разработаны специальные установки. Например, швейцарская установка Evatec LLS Evo II (рис. 4) содержит до 5 магнетронных источников и позволяет напылять металлы и ТСО пленки. Установка оснащена опциями автоматической загрузки и выгрузки подложек из

кассеты в кассету. В такой установке очистка подложек проводится с помощью плазмы, что предотвращает загрязнение рабочей камеры.

Вакуумная магнетронная напылительная установка VSM-BASIC компании ROBvac (рис. 5) может применяться для напыления деталей в мелкосерийном производстве, а также для выполнения научно-исследовательских работ. Данная установка может содержать от одного до трех магнетронов, полуавтоматическую или автоматическую систему управления, размер рабочей камеры составляет 400 – 600 мм. На основе такой установки в Научно-образовательном ресурсном центре «Нанотехнологии» Омского государственного технического университета применяется установка магнетронного напыления с системой напуска газа и измерителем толщины покрытия ADVAVAC VSM-200.



Рис. 4. Внешний вид установки Evatec LLS Evo II



Рис. 5. Внешний вид установки VSM-BASIC компании ROBvac

В работах отечественных и зарубежных авторов отражены вопросы применения технологии магнетронного напыления для повышения износостойкости поверхностного слоя деталей и режущего инструмента [11], [12]. В частности, в работе [11] с помощью технологии магнетронного напыления на сверла из стали HSS фирмы Bosch наносили покрытие на основе Cr-Al-N. В результате применения сверла с нанесенным покрытием для сверления пластинки толщиной 10 мм из стали 12X18H9T было определено оптимальное значение объемной доли фазы Al-N – 75 %, при котором износостойкость сверла возросла в 4–6 раз по сравнению с исходными значениями.

В исследованиях [13] на поверхность из стали 40X (диск Ø 20 x 5 мм) наносили методом магнетронного напыления наноструктурированные покрытия на основе углерода (AlSiCr)C:H; (AlSiTi)C:H; CrN/CNx. Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что, несмотря на невысокую твердость исследуемых покрытий (HV 1802 – 2263), наблюдается их хорошая адгезия. А проведенные испытания на износостойкость показали низкие значения коэффициентов трения. Так для покрытия (AlSiCr)C:H коэффициент трения – 0,02, а для (AlSiTi)C:H – 0,06. Именно из-за низких значений коэффициентов трения предложено использование данных покрытий в парах трения.

В работе [14] на образцы из высокопрочной стали 38ХН3МФА с использованием мишени из стали 12Х18Н9 были нанесены покрытия с толщиной 15 мкм с повышенной стойкостью к водородному износу. В результате испытаний на износ на машине трения было установлено, что увеличение нанотвердости покрытий более чем в три раза по сравнению с исходной (до значений 25,7 ГПа) способствует повышению износостойкости деталей при работе в паре трения с полиамидом ПА-66.

В статье [15] был проведен сравнительный эксперимент по нанесению многослойного покрытия CrN/AlN с изменением параметров магнетронного напыления. Наилучшую износостойкость показали образцы, где твердость нанесенного покрытия составляла 41 и 42 ГПа, а толщина покрытия 4,5 и 5,3 мкм.

Технология магнетронного напыления также может применяться для изменения характеристик уже имеющихся покрытий. В исследованиях [16] для улучшения свойств твердого смазочного покрытия WS₂, которое из-за плохой адгезии имеет ограниченное применение в аэрокосмической отрасли, наносили методом магнетронного напыления композиционное покрытие W/DLC/WSC на образцы из титанового сплава TC4 и сплава k20. В результате микротвердость поверхностного слоя достигала HV 1600 для сплава k20 и HV 700 для сплава TC4. Адгезия покрытия улучшалась с увеличением содержания углерода.

Основной задачей технологии машиностроения является повышение износостойкости сопрягаемых деталей. Анализ работ показал, что такая проблема может быть решена с помощью технологии магнетронного напыления. Исследования в области повышения износостойкости поверхностей с помощью технологии магнетронного напыления охватывают все стороны проблемы: оборудование, режимы, состав наносимых покрытий, методы контроля качества поверхности, экспериментальные исследования влияния режимов на качество поверхности. Но в то же время мало внимания уделяется экспериментальным исследованиям влияния режимов обработки на износостойкость для наиболее часто встречающихся пар трения: сталь – чугун или сталь – бронза. В работах не уделено достаточно внимания обеспечению триботехнических параметров поверхностей, на которых нанесено покрытие, отсутствует четкая методика назначения рациональных параметров магнетронного напыления, при которых обеспечивается высокая износостойкость поверхности.

Библиографический список

1. Скобелев С. Б., Ковалевский В. Ф. Технологические методы повышения износостойкости деталей пар трения: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 116 с.
2. Коротков В. А. Износостойкость материалов с плазменной закалкой // Трение и износ. 2011. Т. 32, № 1. С. 23–29.
3. Гоман А. М., Кукаренко В. А. Контактная выносливость зубьев зубчатых передач, подвергнутых ионно-лучевому азотированию // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 1. С. 85–91.
4. Вирт А. Э. Влияние режимов обработки при ППД на шероховатость обрабатываемой поверхности // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. №11 (часть 4). С. 547–549.
5. Исаев А. Н., Лесняк С. В., Лесняк О. В. Технология получения многослойных соединений тел вращения методами ППД с внутренними макро– и микропокрытиями // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения. 2016. С. 252–255.
6. Скобелев С. Б., Ковалевский В. Ф. Изменение износостойкости стали 35 при ударно-акустической обработке с внедрением твердой смазки // Омский научный вестник. 2017. № 6 (156). С. 15–18.
7. Беликов А. И., Чжо Зин Пью, Самарцев А. С. Исследование тонких пленок MoS₂, полученных магнетронным напылением // Наноматериалы и наноструктуры – XXI век. 2017. Т. 8, №4. С. 37–40.
8. Макарова М. В., Моисеев К. М., Назаренко А. А., Лучников П. А. Технологические особенности формирования толстых медных пленок, осажденных при

жидкофазном магнетронном распылении мишени и их свойства // Наноматериалы и наноструктуры – XXI век. 2017. Т. 8, № 4. С. 41–46.

9. Харьков М. М., Казиев А. В., Тумаркин А. В. [и др.]. Упрочнение поверхности сплава ВТ-22 методом плазменного азотирования с последующим магнетронным напылением нитрида титана // Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2017. 2017. С. 258–259.

10. Блейхер Г.А. и др. Магнетронное осаждение покрытий с испарением мишени // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, № 12. С. 56–62

11. Гордийчук Д. А., Сергеев В. П., Воронов А. В. Повышение износостойкости сверл методом ионно-магнетронного осаждения покрытий на основе системы Cr-Al-N // Современные техника и технологии: сб. материалов XVII Междунар. науч.-практ. конф. Томск: ТПУ, 2011. С. 461–462.

12. Сутягин В. В., Сайкин С. А. Повышение ресурса концевой инструмента за счет применения нанокompозитных PVD-покрытий при обработке титан сплавов в авиастроении // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. №5. С. 41–44.

13. Кононов Д. М., Жданов А. В., Королев А. Н. Изучение свойств наноструктурированных PVD-покрытий на основе углерода // Современные проблемы науки и образования. Пенза: Издат. дом «Академия естествознания», 2011. № 6. С. 130–134. ISSN 1817-6321. URL: <http://www.science-education.ru/100-5252>.

14. Сергеев В. П., Федорищева М. В., Сунгатулин А. Р. Изменение износостойкости стали 38ХНЗМФА при магнетронном напылении нанокompозитных покрытий на основе Fe-Cr-Ni-N // Физическая мезомеханика. Томск: Изд-во Ин-та физики прочности и материаловедения СО РАН, 2005. Т. 8, № S (спец. выпуск). С. 117–120.

15. Букарев И. М., Жданов А. В. Исследование влияния технологических параметров процесса магнетронного осаждения на износостойкость покрытия CrN/AlN // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2. С. 277.

16. Wei Chunbei, Dai Mingjiang, Hou Huijun [et al.]. Improvement of adhesion of WSC composite films by magnetron sputtering // Перспективные материалы. 2011. № 13. С. 332–336.

УДК 669.15-194.53

К.А. Скорород, А.Е. Иорх, Д.А. Щербаченко

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ ВАНАДИЕМ МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВА

Аннотация. Основным объектом исследований являлись микролегированные образцы, полученные вакуумно-дуговым переплавом стали марки У8А и ванадия марки ВНМ-0. Для защиты расплавленного сплава от воздействия атмосферных газов использовали атмосферу аргона. В работе использовались методы световой металлографии, а также оценки микротвердости по методу Виккерса. Структурные исследования показали, что карбонитридные частицы ванадия равномерно распределены по телу зерна, а не по границе бывших аустенитных зерен. Микротвердость полученных образцов значительно выросла по сравнению с исходной в 4 раза.

Ключевые слова: микролегирование, ванадий, гетерофазная структура, вакуумно-дуговая металлургия, ВДП.

Современная промышленность ориентирована на повышение технического уровня и качества продукции, определяющих научно-технический и экономический потенциал страны. В качестве микролегирующих добавок могут использоваться ванадий, титан, ниобий и редкоземельные металлы.

Одним из наиболее востребованных микролегирующих элементов является ванадий. Причиной такой востребованности стала эффективность микролегирования ванадием для получения металла с высокими служебными свойствами. Ванадий проявляет себя как активный карбидообразующий элемент [1]. Основное отличие микролегирующих добавок в том, что механизм воздействия связан с выделением карбидных фаз. Такие дисперсные выделения фаз, которые формируются в структуре при процессе распада пересыщенных твердых растворов, служат препятствием для движения дислокаций, вызывая упрочнения матриц. На свойства железоуглеродистых сплавов ванадий оказывает сильное влияние, так как имеет потенциал свободной энергии для формирования нитридов и карбидов.

Небольшие добавки ванадия приводят к повышению предела текучести стали и увеличению отношения предела текучести к пределу прочности. Карбидные включения вызывают сильное измельчение структуры стали и способствуют замедлению роста зерна при нагреве. Добавка ванадия нейтрализует в стали вредное действие водорода, являющегося причиной образования в ней флокенов [2].

Формирование высококачественных легированных железоуглеродистых сплавов является актуальной проблемой современного материаловедения. Перспективным методом получения микролегированных сталей является вакуумно-дуговой переплав.

Достоинства этого метода заключаются в нулевом окислении переплавляемого металла, отсутствии контакта металла с керамическими материалами, возможности гибкой регулировки параметров нагрева, отсутствии чрезмерного загрязнения массива инородными частицами. Слитки, полученные после вакуумно-дугового переплава, имеют высококачественную поверхность. Эта технология позволяет получать высококачественные легированные сплавы, упростить операцию легирования, обеспечивает качественный переплав основы и легирующих элементов.

Вакуумно-дуговая плавка отличается высокой концентрацией тепла в дуге, поэтому (ВДП) получила широкое распространение при производстве легированных материалов тугоплавкими металлами (титана, циркония, ниобия, молибдена, вольфрама и др.).

Целью работы является установление закономерностей формирования структуры и свойств микролегированной ванадием стали.

Образцы были получены на кафедре «Материаловедение в машиностроении» НГТУ в лабораторной печи вакуумно-дугового переплава с нерасходуемым электродом Arc Melter System AM. Смесь исходных материалов помещается в кристаллизатор, после чего рабочая камера герметично закрывается и вакуумируется. В качестве защитной атмосферы используется аргон. Когда печь подготовлена к плавке, на электроды, представляющие собой шток с вольфрамовым наконечником, и шихтовый материал, находящийся в контакте с медным кристаллизатором, подается напряжение, после чего оператор приводит их в контакт, вызывая тем самым кратковременное короткое замыкание. В результате отрыва вольфрамового электрода от шихты между ними загорается электрическая дуга, за счет горения которой происходит переплав. В качестве шихтовых материалов использовались ванадий марки ВНМ-0 и углеродистая сталь марки У8А. Полученные образцы подвергали термической обработке, которая заключалась в отпуске при температуре 560 °С. Обработка выполнялась для снятия внутренних напряжений и для улучшения распределения легирующих элементов

Общий вид полученных образцов представлен на рисунке 1.

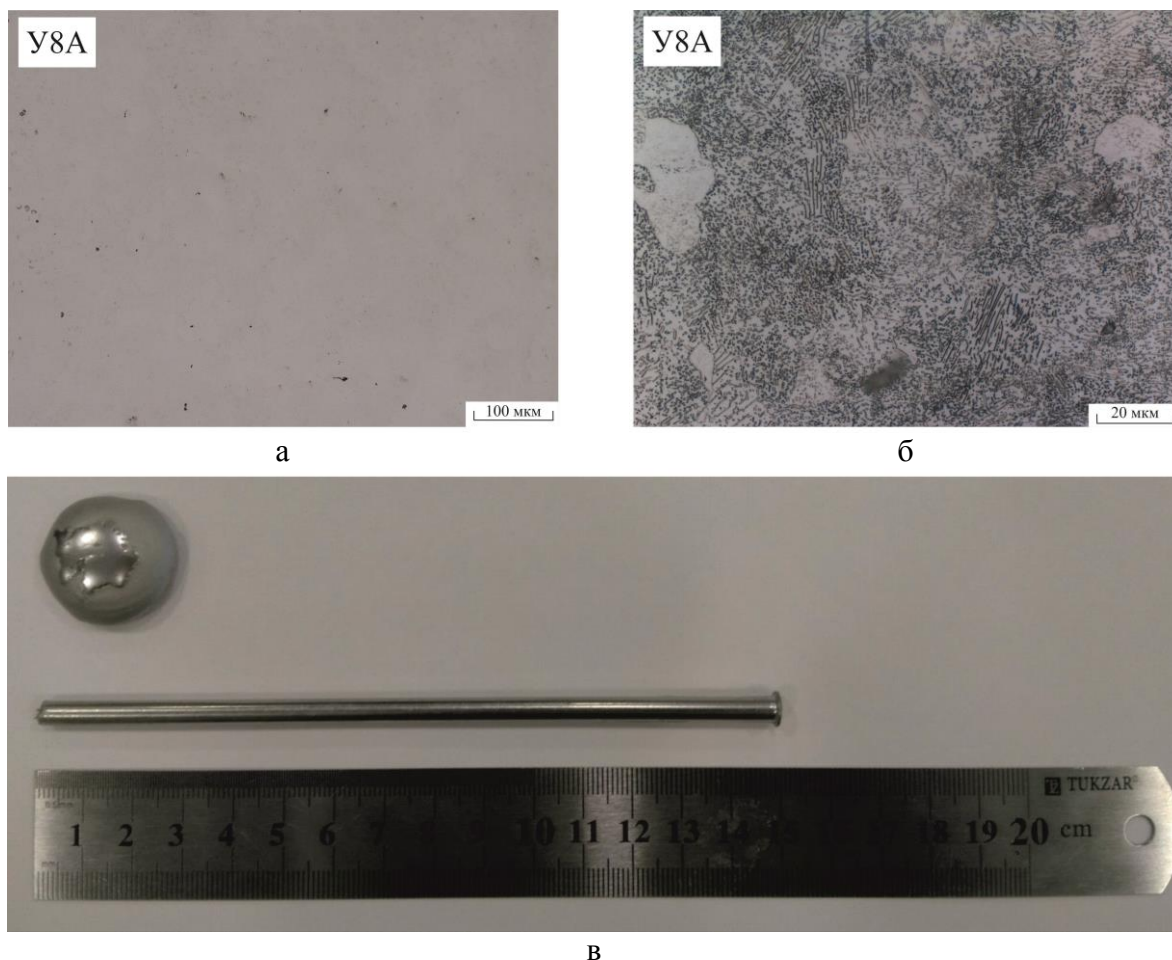


Рис. 1. Общий вид образцов, выплавляемых в вакуумно-дуговой печи с нерасходуемым электродом Arc Melter System AM: а) общий вид нетравленного образца, б) общий вид травленного образца; в) форма образцов, получаемых в печи Arc Melter System AM

Микролегирование стали сильным карбидообразующим элементом способствует образованию большого числа включений. Благодаря тому что ванадий имеет большое сродство к углероду и азоту в стали, даже с незначительным количеством этих элементов образуются включения карбидов и нитридов (или карбонитридов). Установлено, что форма включений зависит от природы включений, а также от температуры их плавления по сравнению с кристаллизацией стали. Формирования включений из жидкой стали в твердом виде приобретают ту кристаллическую форму, которая характерна для данного вещества. Поскольку температура плавления нитрида ванадия и карбида ванадия составляет соответственно 2320 °С и 2770 °С, а это выше температуры плавления железа, а тем более стали. Таким образом, карбиды и нитриды (карбонитриды) ванадия имеют вид хорошо организованных кристаллов с явно выраженными гранями и углами (рис. 2). Включения, которые кристаллизуются позже из окружающей их матрицы, принимают многогранную форму. Обнаруженные в структуре легированных образцов частицы правильной формы являются преимущественно карбонитридами или нитридами, включения неправильной формы – карбидами. Которые, в свою очередь, влияют на комплекс механических свойств.

Измерения микротвердости полученных образцов системы "сталь – легирующий элемент" выполнялись на образцах непосредственно после формирования слитка, а также после отжига.

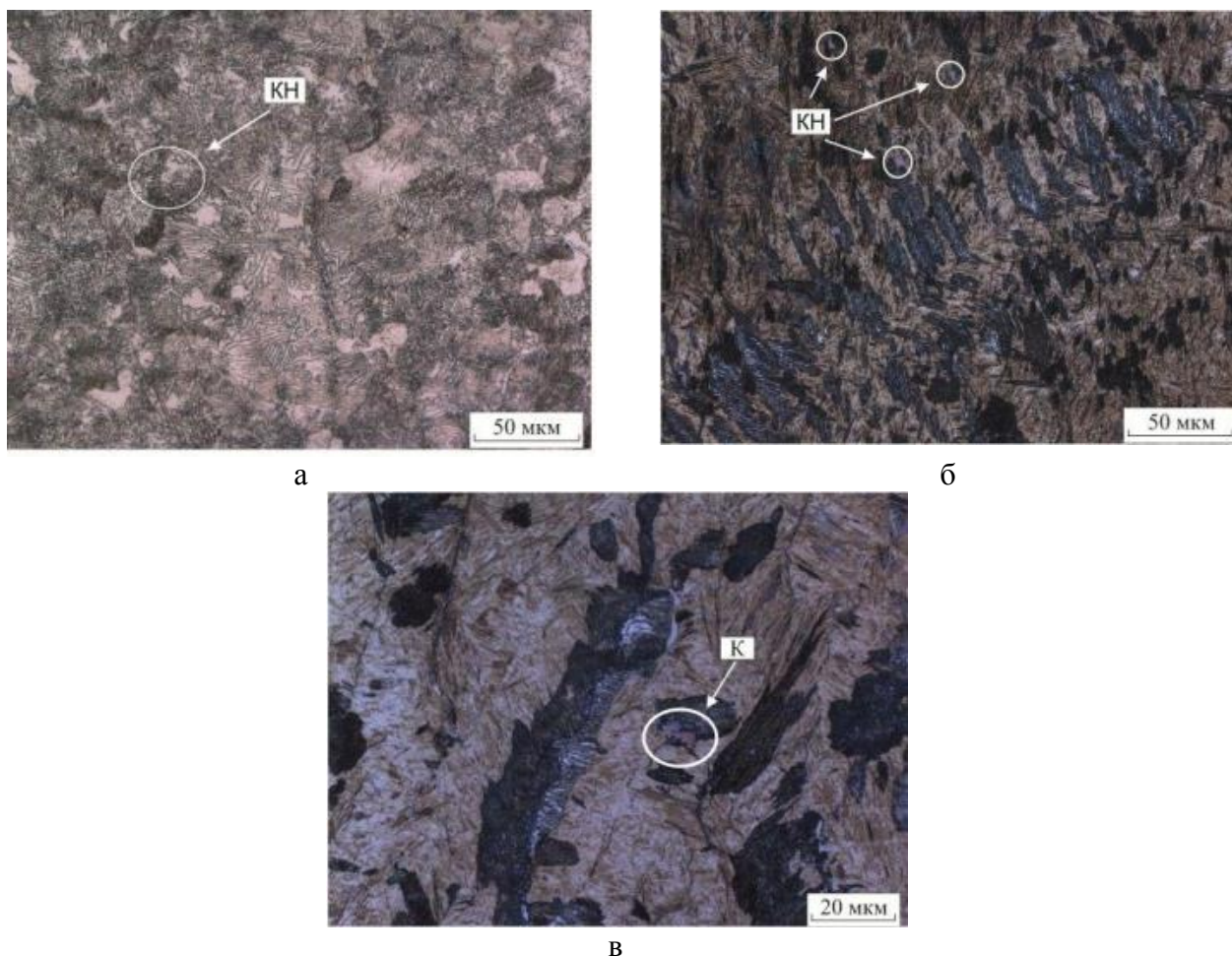


Рис.2. Структура образцов при содержании ванадия 0,3%V (а), микролегированная сталь с содержанием 0,8%V(б), присутствия карбида (в): КН – карбонитрид; к – карбид

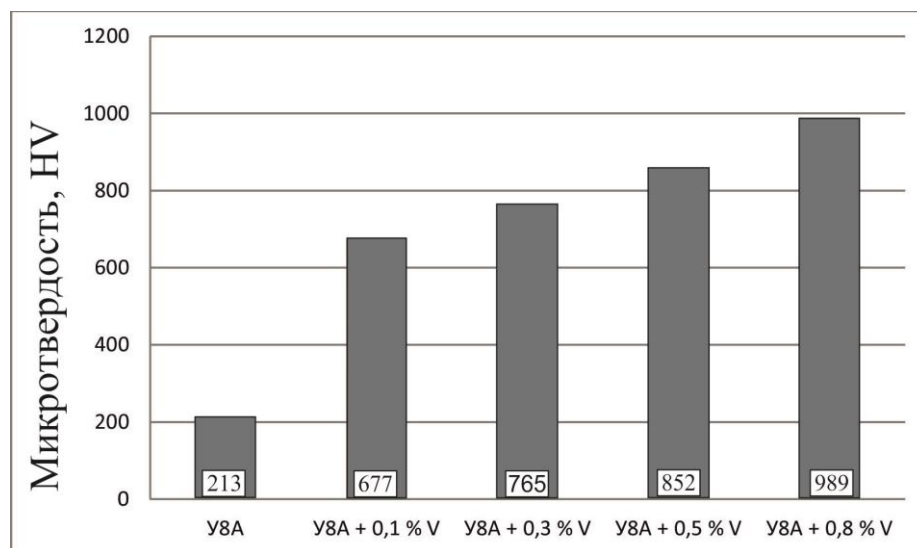


Рис. 3. Микротвердость исследуемых образцов, микролегированных ванадием

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что на микротвердость наплавленных покрытий влияние оказывает комплекс факторов: количество высокопрочных карбидов, образующихся на стадии кристаллизации расплава; свойства металлической матрицы, окружающей частицы. Разброс значений микротвердости, наблюдаемый на

построенных зависимостях, обусловлен формированием гетерофазной структуры и неоднородностью распределения упрочняющих частиц в объеме металлической матрицы. Максимальным значением микротвердости обладает образец, микролегированный 0,8% ванадием по весу и составляет 989 HV.

Библиографический список

1. Казачков Е. А., Чепурной А. В. Вакуумно-дуговой переплав. Мариуполь.: ММИ, 1992. 28 с.
2. Изотов В. И. Выделение дисперсных карбидов ванадия на межфазной границе при перлитном превращении стали // ФММ. 2011. Т. 111, № 6. С. 619–625.
3. Патент № 2599757 Российская Федерация. Способ получения карбида ванадия / Ю. Л. Крутский, К. Д. Дюкова, А. Г. Баннов, П. Б. Курмашов, В. В. Соколов, А. Ю. Пичугин, Ю. А. Вязьмина. Заявитель НГТУ. № 2014118821/05, заявл. 08.05.2014, опубл. 10.10.2016. Бюл. № 28.

УДК 620.181.4

В.Р. Эдигаров, Б.Ш. Алимбаева, П.С. Перков

Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия

ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация. Представлены результаты аналитического изучения закономерностей формирования структуры поверхностного слоя при электромеханической обработке. Исследованы процессы высокоскоростного нагрева и охлаждения материала при ЭМО и происходящие при этом аустенитные превращения.

Ключевые слова: структура, аустенит, феррит, перлит, электромеханическая обработка, цементит.

В процессе разработки технологического процесса термической обработки стальных деталей многоцелевых гусеничных и колесных машин, как правило, используется диаграмма состояния железо-углерод. Однако эта диаграмма не в полной мере характеризует процессы, происходящие при термической обработке, особенно осуществляемой комбинированными способами, являющимися сочетанием нескольких видов высокоэнергетического воздействия. Для таких способов характерны значительные скорости температурных изменений в зоне обработки, измеряемые сотнями градусов в секунду [1], таким способом термической обработки является электромеханическая обработка (ЭМО) и различные ее комбинированные разновидности [2].

ЭМО основывается на фрикционно-силовом воздействии инструмента на поверхностный слой обрабатываемой детали, сопровождающемся локальным нагревом металла электрическим током большой величины и малого напряжения. В результате термомеханических процессов происходит изменение физико-механических свойств поверхностного слоя, это прежде всего увеличение твердости и, соответственно, прочности. Процесс ЭМО характеризуется следующими особенностями [1]:

- одновременное взаимодополняющее воздействие на поверхностный слой обрабатываемой детали нескольких источников: термического (электрического тока и фрикционного обрабатывающего инструмента) и деформационно-силового (обрабатывающего инструмента);
- термическое воздействие на поверхностный слой обрабатываемой детали происходит от двух источников тепла: фрикционное взаимодействие обрабатывающего инструмента и поверхности детали (внешняя теплота) и прохождение электрического тока через зону контакта рабочего инструмента и поверхности детали (внутренняя теплота);
- высокие скорости нагрева, определяемая скоростью распространения электрического тока, и охлаждения обрабатываемых объемов поверхностного слоя, определяемая отводом тепла во внутренние объемы;
- кратковременность термдеформационного воздействия на элементарный объем обрабатываемой поверхности;
- возможность неоднократного термдеформационного воздействия в зависимости от числа рабочих ходов.

Изучение технологических особенностей формирования поверхностного слоя при ЭМО является актуальной научно-технической задачей, а исследование свойств и закономерностей формирования структуры поверхностного слоя в процессе обработки является важным вопросом материаловедения.

При ЭМО наиболее важным этапом процесса упрочнения является высокоскоростной нагрев, так как в процессе последующего быстрого охлаждения, за счет резкого отвода тепла вовнутрь детали, фиксируются стадии превращений.

Создав комплекс условий для проявления в небольшом локальном объеме металла микропластичности, используя при этом наряду с механической тепловую энергию, а также модификатор, производится формирование аморфизированных структур в поверхностном слое металла. Под действием тепловой энергии временно снижается прочность металла в зоне обработки, и, следовательно, процесс идет при меньшем давлении и больших деформациях сдвига. Теплота выделяется при трении и прохождении электрического тока через зону обработки. Деформации сдвига происходят вследствие контакта инструмента и детали. Подача инородного материала, например, дисульфида молибдена, в зону обработки приводит к химическим реакциям и смешению веществ, полученная смесь приобретает общие для всех компонентов свойства. Причем увеличенные скорости нагрева приводят к повышению твердости поверхностного слоя.

Классическая теория термической обработки сталей трактует нагрев выше точки A_{c1} как начало превращения перлита в аустенит. Местом первоначального появления аустенита в перлитной стали является ферритно-цементитная граница. Первоначальное образование аустенита приводит к превращению феррита в аустенит, которое происходит в условиях незначительных скоростей нагрева путем диффузионной перестройки кристаллической решетки ОЦК в решетку ГЦК. Параллельно с этим процессом идет растворение цементита и граница «аустенит - цементит» смещается к центру цементитной фазы. Процесс перестройки кристаллической решетки ОЦК в решетку ГЦК происходит с одновременным перераспределением углерода за счет его диффузии в аустените от границы с цементитом к границе с ферритом. При последующем соприкосновении растущих кристаллов аустенита рост прекращается, и далее происходит выравнивание концентрации углерода в аустените, т.е. гомогенизация. Кинетика формирования аустенита в случае медленного нагрева может быть описана уравнением А. Н. Колмогорова [3]:

$$V(t) = V_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t G(\tau) \varphi(\tau) d\tau \right] \right\}, \quad (1)$$

где $V(t)$ - объем аустенита в момент времени t ; V_0 - исходный объем аустенита; $G(\tau)$ - скорость роста зародышей аустенита; $\varphi(\tau)$ - объем, занятый зародышем аустенита в момент τ .

Высокоскоростной нагрев, который характерен для ЭМО, имеет ряд особенностей, в нем процесс образования аустенита отличен от вышеописанного. Образующееся в процессе термодформационного воздействия тепло в зоне фрикционно-электрического контакта значительно превосходит энергию, минимально необходимую для перестройки кристаллической решетки. При этом перестройка кристаллической решетки происходит с некоторой конечной скоростью. То есть превращение протекает в определенном интервале температур от A_i до A_j . Критическая точка A_{c1} в данном варианте термической обработки сдвигается в область высоких температур, соответственно смещая концы аустенитного превращения на определенную величину ΔT .

В работах [3,4] приведены величины примерного сдвига критических точек, которые напрямую зависят от скорости нагрева и охлаждения, химического состава и структуры стали и, как правило, находятся в интервале 50...200 °С. Кроме того, на величину ΔT оказывает влияние форма цементита в перлите [3,4], а зернистый перлит приводит к большему сдвигу точки A_{c1} , нежели пластинчатый [4].

Данных по экспериментальному определению величины сдвига критической точки A_{c1} при нагреве в процессе ЭМО в настоящее время весьма приблизительны и обычно ориентируются на скорость нагрева, достигающую $10^3...10^4$ град/с.

При ЭМО превращение феррита в аустенит может завершаться при более низких температурах, чем превращение $\text{Ц} \rightarrow \text{А}$ (цементит $\rightarrow$ аустенит). При этом можно выделить три стадии аустенизации: $\text{Ф} \rightarrow \text{А}$ (I), $\text{Ц} \rightarrow \text{А}$ (II) и гомогенизацию (III), т. е. диффузионное выравнивание концентрации углерода в аустените. Дальнейшее увеличение скорости нагрева, определяемое технологическими параметрами обработки, приводит к смещению завершения вышеуказанных стадий в область высоких температур, при этом разница в концентрации углерода между цементитными и ферритными участками возрастает.

Окончание процесса превращения феррита в аустенит в точке A_{c1} для эвтектоидной стали приведет к завершению процесса растворения цементита при значительно больших температурах.

При ЭМО стали 38ХС процесс образования аустенита из перлита происходит в интервале температур от A_i до A_j . При этом происходит одновременное превращение избыточного феррита и перлита в аустенит. Образованию аустенита на границах зерен феррита и в ферритных зернах по границам блоков способствует высокоскоростной нагрев, это связано с перегревом и снижением критического размера зародышей аустенита. Скоростной нагрев может привести к изменению последовательности превращения структурных составляющих.

При высокоскоростном нагреве, характерном для ЭМО, наблюдается сдвиг точки A_{c3} на некоторую величину в область высоких температур, при этом диффузионные процессы перестройки решетки ОЦК избыточного феррита в ГЦК-решетку аустенита могут не успевать заканчиваться на линии GS диаграммы железо - углерод.

То есть можно сделать вывод о том, что с увеличением скорости нагрева температура ΔT увеличивается, это подтверждается проведенными ранее исследованиями авторами работ [3,4], в них же доказывается изменение механизмов $\alpha \rightarrow \gamma$ превращений при увеличении скорости нагрева, со смещением в высокотемпературную область.

Таким образом, в условиях скоростного нагрева в процессе ЭМО железоуглеродистых сплавов могут иметь место такие эффекты, как протекание превращения $\text{П} \rightarrow \text{А}$ не изотермически, а в интервале температур, сдвиг критической точки A_{c3} в область высоких температур. Во всех случаях процесс диффузионного перераспределения углерода в аустените, т. е. гомогенизация аустенита, смещается в область еще более высоких температур.

Высокоскоростной нагрев приводит к сдвигу критических точек, а также приводит к смещению температуры рекристаллизации деформированного сплава. Автор работы [5] установил, что для стали, деформированной на 60%, с увеличением скорости нагрева до 500...650 град/с температура рекристаллизации повышается до 700...900°С. При этом имеет место изменение последовательности стадий рекристаллизации. С увеличением скорости нагрева температура рекристаллизации смещается в область высоких температур более интенсивно, чем температура точки A_{c1} .

Значительные скорости охлаждения приводят к повышенной дефектности структур, так как усиливается фазовый наклеп, замедляются процессы отжига и рекристаллизации. При этом происходит измельчение блоков, увеличение плотности дислокаций и рост напряжений в кристаллической решетке.

Нужно отметить, что образующийся при ЭМО мартенсит более дисперсный, чем при обычной закалке, так, например, для стали У8 после обычной закалки длина игл мартенсита составляет 7... 10 мкм, а после ЭМО - всего 2...3 мкм. Все эти особенности приводят к тому, что микротвердость сплавов после ЭМО выше, чем после обычных видов закалки (для сталей на 1000...2000 МПа).

Библиографический список

1. Аскинази Б. М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с.
2. Эдигаров В. Р., Килунин И. Ю., Дегтярь В. В. Классификация комбинированных методов обработки на основе электромеханического упрочнения // Современные наукоемкие технологии. 2012. № 3. С. 32–36.
3. Малышко С. Б., Тарасов В. В. Особенности фазовых превращений при электромеханической обработке // Вестник морского государственного университета. Сер. Судостроение и судоремонт. 2007. Вып. 17. С. 50–54.
4. Малышко С. Б., Тарасов В. В. Влияние дисперсности феррито-цементитной смеси на полноту протекания фазовых превращений при ЭМО // Проблемы транспорта Дальнего Востока: Материалы седьмой международной научно-практической конференции / ДВО РАТ. Владивосток, 2007. С. 189.
5. Багмутов В. П., Захаров И. Н. Моделирование структурных превращений при электромеханической обработке стали // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 4. С. 29–32.

УДК 548.73

А.С. Ярославская, С.Ю. Галле

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

РАСЧЕТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ ПО ГЛУБИНЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Аннотация. Для выбора наиболее эффективного режима обработки поверхности изделий целесообразно определить следующие зависимости: распределение поглощенной дозы по глубине образца, распределение и перераспределение различных дефектов кристаллической решетки, а также описание радиационно-стимулированных процессов, влияющих на механические свойства поверхности. В данной статье представлен способ

расчета, а также проведен расчет поглощенной дозы пучка электронов по глубине металлических образцов. Электронно-лучевая обработка может быть использована в разработке радиационных технологий.

Ключевые слова: поглощенная доза пучка электронов, поверхность изделий, радиационные технологии, электрон, металлический образец.

В данной работе представлен способ расчета поглощенной дозы пучка электронов по глубине металлических образцов: Ti, V, Cr, Mn. Данные, полученные при электронно-лучевой обработке материалов, могут использоваться в разработке радиационных технологий. Облучение высокоэнергетичными электронами возбуждает протекание в веществах физико-химических реакций, которые можно применять для избирательного изменения свойств приповерхностной области образца. А также используется для образования или деструкции тонких слоев на его поверхности и внутри материала на заданной глубине. Это дает возможность повысить устойчивость образца к механическим повреждениям и внешним воздействиям температур, что повышает срок эксплуатации и, следовательно, создает экономический эффект.

Для того чтобы выбрать наиболее эффективный режим обработки поверхности изделий, очень важно знать следующие зависимости: распределение поглощенной дозы по глубине образца, распределение и перераспределение различных дефектов кристаллической решетки, а также описание радиационно-стимулированных процессов, влияющих на механические свойства поверхности. Также необходимо определить зависимости перечисленных величин от характеристик облучаемого пучка (таких как энергия заряженных частиц, плотность тока, время облучения и т.д.) и от характеристик обрабатываемого вещества [1, 2].

В данной работе проведены расчеты поглощенной дозы при облучении пучком электронов.

Методика расчета поглощенной дозы. Для необходимости описания распределения удельных потерь энергии по глубине использована функция Гаусса [1]:

$$G(x) = G_m \exp \left[-\frac{(x-x_m)^2}{\Delta x_m^2} \right] = G_m \exp \left[-\left(\frac{x}{\Delta x_m} - \chi \right)^2 \right], \quad (1)$$

здесь $\chi = x_m / \Delta x_m$ характеризует относительное положение точки максимума распределения, а Δx_m - его полуширину. На основе анализа экспериментального материала удалось показать, что можно определить параметры χ , Δx_m и G_m распределения (1), если известны лишь две экспериментальные характеристики: максимальная глубина проникновения электронов $R_{x\max}$ и коэффициент обратного рассеяния η , что можно описать следующими эмпирическими соотношениями [1]:

$$\chi = \frac{x_m}{\Delta x_m} = 0,16\eta^{-0,65}, \quad (2)$$

$$\Delta x_m = \frac{(R_{x\max} - x_m)}{2} = \frac{R_{x\max}}{2 + \chi} \quad (3)$$

Величину G_m находят из условия равенства площади под кривой G_x и энергии, поглощенной в мишени:

$$\int_0^{\alpha} G(x) dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \Delta x_m G_m (1 + \operatorname{erf} \chi) = E_1 (1 - W_\eta) \quad (4)$$

где $\operatorname{erf} \chi = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ - функция ошибок, а доля энергии W_η , уносимая обратно рассеянными электронами, определяется только значением η (из формулы (5)).

$$\omega_{cp} = \frac{E_{2cp}}{E_1} = (0,5 + 0,4\eta). \quad (5)$$

$$G_m = 2E_1 (1 - 0,5\eta - 0,4\eta^2) [\sqrt{\pi} \Delta x_m (1 + \operatorname{erf} \chi)]^{-1} \quad (6)$$

На основе зависимости от энергии падающего пучка E_1 следующих параметров: пробега электронов $R_{\text{хmax}}$ и коэффициента η с помощью формул (1) - (5) можно рассчитать $G(x)$ практически для любых веществ в большом диапазоне энергий [3, 4].

Используя вышеизложенную методику, проведен расчет распределения поглощенной дозы пучка электронов по глубине металлических образцов: Ti, V, Cr, Mn с энергией 100 кэВ, 200 кэВ и 500 кэВ (рис. 1-4, табл. 1-4).

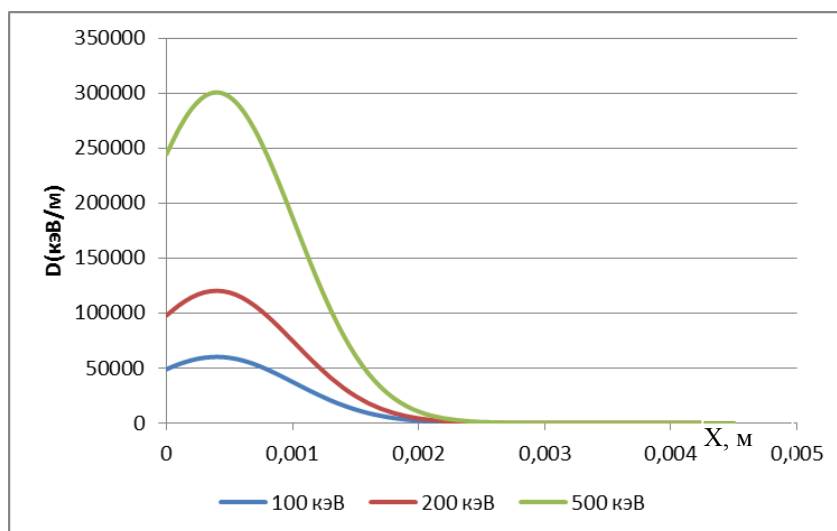


Рис. 1. Распределение поглощенной дозы пучка электронов по глубине металлического образца Ti с энергией 100 кэВ, 200 кэВ, 500 кэВ

Таблица 1

Ti	100 кэВ	200 кэВ	500 кэВ
Максимум поглощенной дозы – D, кэВ/м	57932	116035	290087
Глубина отмеченного максимума – h, м	0,00038	0,00028	0,00042

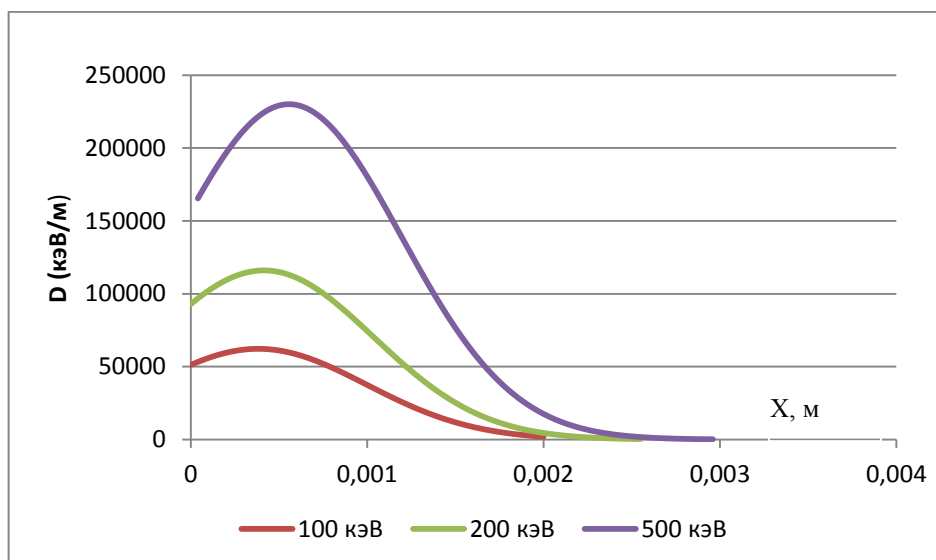


Рис. 2. Распределение поглощенной дозы пучка электронов по глубине металлического образца V с энергией 100 кэВ, 200 кэВ, 500 кэВ

Таблица 2

V	100 кэВ	200 кэВ	500 кэВ
Максимум поглощенной дозы – D, кэВ/м	62238	116035	229704
Глубина отмеченного максимума – h, м	0,00038	0,00042	0,00056

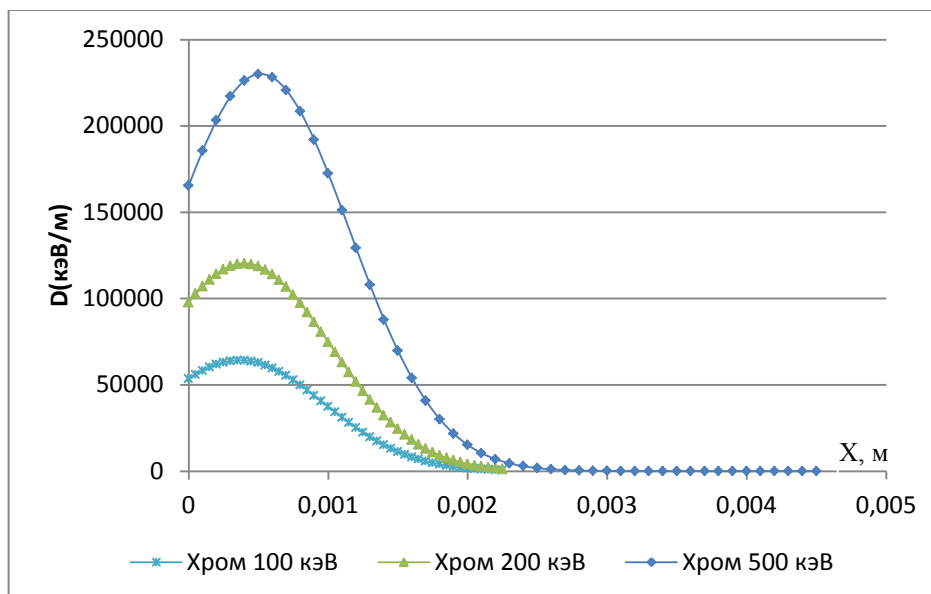


Рис. 3. Распределение поглощенной дозы пучка электронов по глубине металлического образца Cr с энергией 100 кэВ, 200 кэВ, 500 кэВ

Таблица 3

Cr	100 кэВ	200 кэВ	500 кэВ
Максимум поглощенной дозы – D, кэВ/м	64258	120307	230008
Глубина отмеченного максимума – h, м	0,00035	0,0004	0,0005

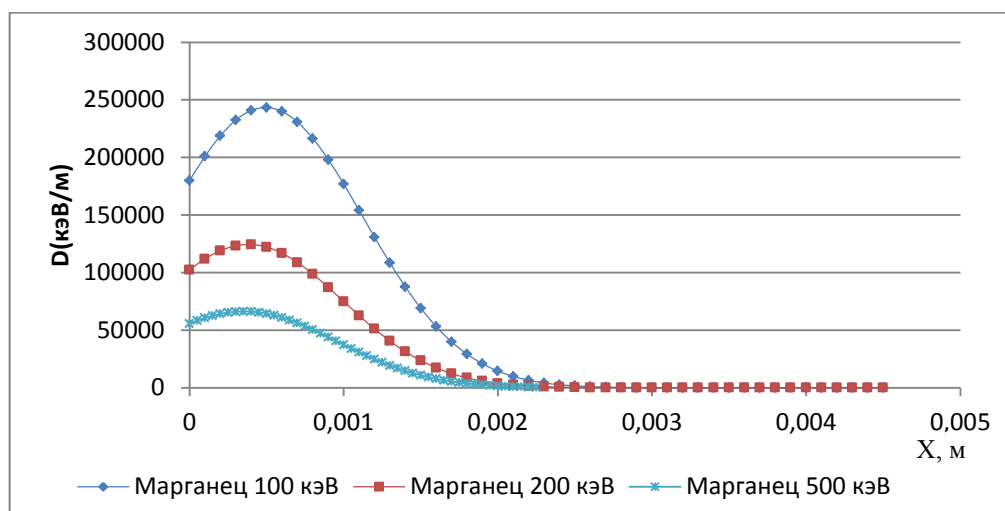


Рис. 4. Распределение поглощенной дозы пучка электронов по глубине металлического образца Mn с энергией 100 кэВ, 200 кэВ, 500 кэВ

Таблица 4

Mn	100 кэВ	200 кэВ	500 кэВ
Максимум поглощенной дозы – D, кэВ/м	66035	124427	243351
Глубина отмеченного максимума – h, м	0,00035	0,0004	0,0005

Положение максимальной поглощенной дозы для образца Mn расположено на глубине 0,5 мм для 500 кэВ. Соответственно 0,35 мм для 100 кэВ. Глубина воздействия нагрева электронным лучом соответственно составляет около 1 мм.

Выводы:

1. Распределение поглощенной дозы имеет несимметричный колоколообразный вид, что согласуется с результатами экспериментов, представленными в литературе.
2. Положение максимума поглощенной дозы определяется энергией электронов.
3. Площадь под кривой поглощенной дозы равна энергии падающих электронов.

Библиографический список

1. Аброян И. А., Андронов А. Н., Титов А. И. Физические основы электронной и ионной технологии. М.: Высшая школа, 1984. 320 с.
2. Гасанов И. С. Плазменная и пучковая технология. Баку.: Элм, 2007. 175 с.
3. Шалаев А. М., Адаменко А. А. Радиационно-стимулированное изменение электронной структуры. М.: Атомиздат, 1977. 176 с.
4. Мурзина Е. А. Взаимодействие излучения высокой энергии с веществом. М.: КДУ, 2007. 96 с.

УДК 621.317.328

С.В. Бирюков^{1,2}, М.А. Королёва¹

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННЫМИ ДАТЧИКАМИ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ

Аннотация. В данной статье проводятся исследования и дается оценка погрешности, вызванной неравенством потенциалов датчика и точки измерения напряженности электрического поля. Выявлена зависимость этой погрешности от расстояния до источника поля, позволяющая оптимизировать размер датчика исходя из его заданной суммарной погрешности. В результате получена методика оценочного расчета погрешности датчика напряженности электрического поля, вызванной неравенством потенциалов проводящего корпуса датчика и точки его размещения в пространстве измеряемого поля.

Ключевые слова: напряженность поля, электрическое поле точечного заряда, датчик напряженности, погрешность от неравенства потенциалов.

Большинство датчиков в средствах измерения напряженности квазистатического электрического поля основаны на явлении электростатической индукции. Суть этого явления сводится к тому, что под действием электрического поля электрические заряды внутри проводника устремляются к его поверхности, в результате чего на противоположных поверхностях проводника появляются разноименные заряды, причем внутри проводника заряды будут отсутствовать, а суммарный поверхностный заряд будет равен нулю. Заряды, возникающие на поверхности проводника, называются индукционными. В конструктивной основе датчика может лежать проводящая подложка различной формы и конечных размеров. Нашему исследованию будут подвергаться однокоординатные электроиндукционные датчики с проводящей подложкой в форме квадратной пластины [1] или диска [2, 3]. Все остальные формы можно представить как проекции на плоскость, представляющие собой, в общем, либо форму квадрата, либо окружности.

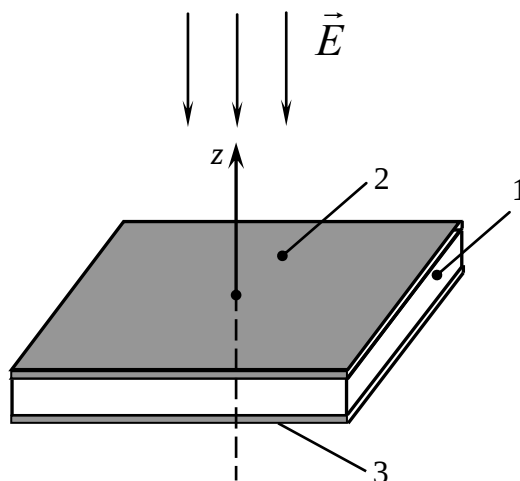


Рис. 1. Датчик напряженности электрического поля с подложкой форме квадратной пластины [1]

Датчик представляет собой проводящую пластину 1 квадратной или круглой формы с размерами сторон $x=2L$ (для квадратной пластины) или радиуса R (для круглой пластины) и толщиной h ($h \ll x$). На двух противоположных поверхностях пластины располагаются проводящие чувствительные элементы 2 и 3, как показано на рис. 1, рис.2.

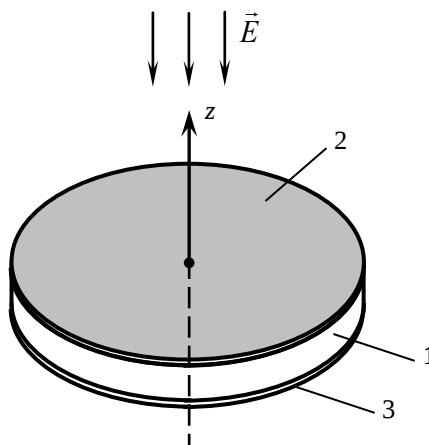


Рис. 2. Датчик напряженности электрического поля с подложкой форме круглой пластины [2, 3]

Чувствительные элементы 2 и 3, представляющие собой тонкий проводящий слой толщиной δ , имеют одинаковые размеры и форму, и расположены на расстоянии ε от поверхности проводящей пластины 1 (рис.3).

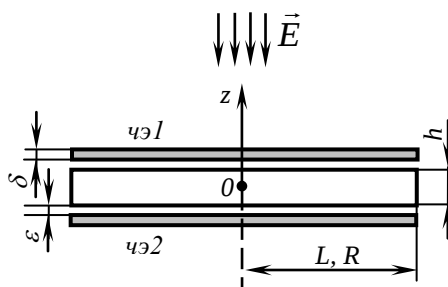


Рис. 3. Конструктивные параметры датчика

Принятые допущения $\delta \ll h$ и $\varepsilon \ll L$, $\varepsilon \ll R$ дают основание считать, что потенциал чувствительных элементов 2 и 3 равен потенциалу проводящей пластины 1, а чувствительным элементом является не что иное, как сама поверхность пластины. Далее будут приняты дополнительные меры, позволяющие считать проводящий чувствительный элемент поверхностью проводящей пластины. Таким образом, датчик в общем случае представляет не что иное, как плоскую проводящую пластину, имеющую квадратное или круглое основание.

Известно [4], что если при измерении напряженности электрического поля проводящее основание или корпус датчика не принимают потенциал точки пространства измерения, то возникают значительные погрешности измерения. Для их уменьшения необходимо либо конструктивно обеспечить равенство потенциалов точки пространства измерения и проводящего основания датчика, либо использовать метод выравнивания потенциалов [4, 5], что усложняет процесс измерения. Конструктивно обеспечить равенство потенциалов возможно уменьшением размера датчика до приемлемого минимума. В идеале

если датчик стянуть в точку, то он примет потенциал точки пространства размещения и погрешность от разности потенциалов сведется к нулю.

Оценим размеры и погрешность датчика, находящегося в неоднородном поле. В качестве неоднородного поля выберем поле точечного заряда, обладающего сильной неоднородностью.

Выдвинем предположение, что если линейный размер датчика будет приблизительно совпадать с эквипотенциальной поверхностью поля точечного заряда, то поле вблизи датчика можно считать однородным, а потенциал датчика равным потенциалу эквипотенциальной поверхности. Следовательно, погрешность датчика, вызванная неравенством потенциалов датчика и эквипотенциальной поверхности, будет минимальна.

Приведем оценку этой погрешности. Для этого построим радиусом R одну из эквипотенциальных поверхностей точечного заряда и разместим вблизи этой поверхности датчик квадратного сечения с линейным размером $L \times L$ или датчик круглого сечения с радиусом R . В наихудшем случае следует рассматривать датчик с квадратным сечением, так как у него максимальный линейный размер будет определяться диагональю квадрата, равной $L\sqrt{2}$, как показано на рис.4.

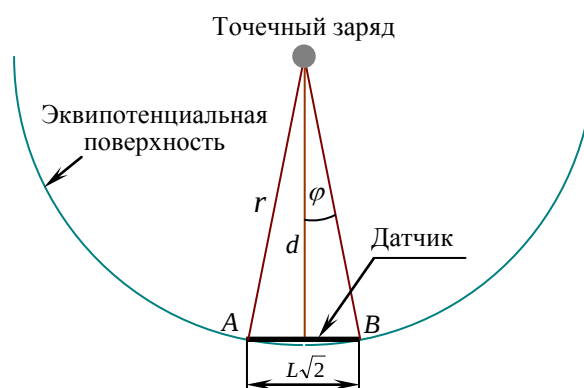


Рис. 4. К расчету погрешности датчика

Из рис. 4 следует, что длина дуги AB сечения эквипотенциальной поверхности не равна линейному размеру датчика, следовательно, датчик не примет потенциал точки пространства и измерения, что приведет к погрешности. Для оценки этой погрешности сравним длину дуги AB эквипотенциальной погрешности с линейным размером L датчика. Длина дуги AB , на которую опирается датчик, будет определяться выражением

$$AB=l=2\varphi R,$$

где $\varphi = \arcsin \frac{(L\sqrt{2}/2)}{r}$; $r = \sqrt{(L\sqrt{2}/2)^2 + d^2}$ - радиус эквипотенциальной поверхности;

$L\sqrt{2}/2$ - половина диагонали датчика квадратной формы (см. рис.1) или радиус R датчика круглой формы (см. рис.2).

Тогда с учетом нормировки $a = \frac{(L\sqrt{2}/2)}{d}$ длина дуги $AB=l$ будет определяться выражением

$$l = 2d \left(\arcsin \frac{a}{\sqrt{1+a^2}} \right) \times \sqrt{1+a^2}$$

Сопоставим длину дуги l эквипотенциальной поверхности с линейным размером диагонали $L\sqrt{2}$ датчика и оценим его погрешность от неравенства потенциалов

$$\delta(a) = \frac{L\sqrt{2} - 2d \left(\arcsin \frac{a}{\sqrt{1+a^2}} \right) \times \sqrt{1+a^2}}{2d \left(\arcsin \frac{a}{\sqrt{1+a^2}} \right) \times \sqrt{1+a^2}} = - \left[1 - \frac{a}{\left(\arcsin \frac{a}{\sqrt{1+a^2}} \right) \times \sqrt{1+a^2}} \right] \times 100.$$

График изменения этой погрешности в зависимости от изменения параметра a от 0 до 1 построен в MathCAD 14 и представлен на рис 5.

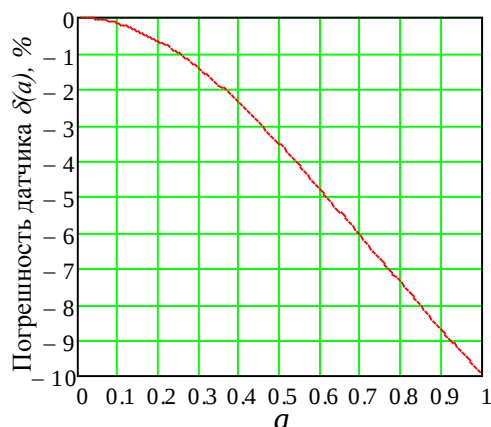


Рис. 5. Погрешность от неравенства потенциалов датчика и эквипотенциальной поверхности в зависимости от параметра $a = (L\sqrt{2} / 2) / d$

Из графика следует, что погрешность $\delta(a)$ отрицательная и изменяется по параболическому закону в зависимости от параметра a . Эта зависимость позволяет по заданному параметру a , суммарной погрешности датчика и минимальному значению индуцированного на датчике заряда определить минимальный размер L датчика.

Например, требуется определить максимально возможный линейный размер датчика по заданной погрешности $\pm 2\%$ и минимально возможному расстоянию до источника поля $d=10$ см. По графику рис. 5 находим, что для заданной погрешности параметр $a=0,4$. Тогда из формулы $a = \frac{(L\sqrt{2}/2)}{d}$ находим, что $L = a \cdot d \sqrt{2}$. Подставляя в эту формулу заданные и определенные по графику рис. 5 значения, получаем $L=5,6$ см.

В результате проведенных исследований получена методика оценочного расчета погрешности датчика напряженности электрического поля, вызванной неравенством потенциалов проводящего корпуса датчика и точки его размещения в пространстве измеряемого поля.

Библиографический список

1. Бирюков С. В., Щапова Л. В. Датчик напряженности электрического поля в виде плоской проводящей пластины в форме квадрата // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2017. № 5 (155). С. 126–130.
2. Бирюков С. В., Королева М. А. Электроиндукционный дисковый датчик напряженности электрического поля // Динамика систем механизмов и машин. 2017. Т. 5, № 4. С. 177–182.

3. Biryukov S. V., Korolyova M. A. Electroinduction disk sensor of electric field strength // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 944 (2017) 012017. P. 8. Doi :10.1088/1742-6596/944/1/012017

4. Юркевич В. М. Кондратьев Б. Л. О методике измерения напряженности и других характеристик электрического поля // Измерительная техника. 1980. № 5. С. 57–59.

5. Кондратьев Б. Л., Юркевич В. М. Измерения в электрическом поле с выравниванием потенциалов // Труды Моск. энерг. ин-та. М., 1979. Вып. 432. С. 20–22.

УДК 539.23

В.О. Борзилов, П.С. Шлотгауэр, П.В. Прудников

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МУЛЬТИСЛОЙНЫХ СТРУКТУР, ОПИСЫВАЕМЫХ АНИЗОТРОПНОЙ МОДЕЛЬЮ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Аннотация. В данной работе проведено моделирование критического поведения мультислойных структур методами Монте-Карло. Было проведено описание влияния одноосной анизотропии на гистерезисные эффекты в мультислойных структурах. Было исследовано влияние толщины ферромагнитного слоя на магнитные характеристики симметричной трехслойной структуры.

Ключевые слова: мультислойные структуры, спинтроника, синтетические антиферромагнитные структуры, методы Монте-Карло, одноосная анизотропия.

Исследование мультислойных структур на основе сверхтонких магнитных пленок микроскопического масштаба имеет существенное прикладное значение в области спинтроники. Структура антиферромагнитно связанных магнитных слоев получила название синтетические антиферромагнетики. В настоящее время синтетические антиферромагнетики используются при конструировании в магнитных запоминающих устройствах с произвольным доступом (MRAM) с целью уменьшения плотности тока и промежутка времени, необходимого для переключения магнитного состояния [1].

Микроскопическая природа анизотропии в пленках Fe, Co, Ni и ее зависимость от толщины пленки в единицах числа моноатомных слоев N определяется влиянием кристаллического поля подложки, одноионной анизотропией и диполь-дипольным взаимодействием магнитных моментов атомов в пленке и их взаимной конкуренцией. Поэтому расчет эффектов анизотропии в магнитных пленках является очень сложной задачей. Детальное исследование размерных превращений в отдельных ультратонких пленках при изменении толщины проведено в работах [2,3].

Мультислойные антиферромагнитные структуры состоят из ферромагнитных слоёв и немагнитной прослойки между ними. Толщина металлической прослойки подбирается таким образом, чтобы дальнodelствующее и осциллирующее межслоевое обменное РККИ-взаимодействие между спинами ферромагнитных слоев носило эффективный антиферромагнитный характер. За счет этого взаимодействия намагниченности соседних ферромагнитных слоев ориентируются противоположно друг другу.

В данной работе исследуются критические свойства мультислойных структур, состоящих из монослоев ферромагнитного материала. Модель описывается гамильтонианом

$$H = -J \sum_{i,j} \mathbf{S}_i \mathbf{S}_j - A \sum_i (S_i^z)^2 - h \sum_i S_i^x,$$

где S_i – трёхмерный спин в i -ом узле решётки, J – константа обменного взаимодействия, A – константа, характеризующая одноионную анизотропию, создаваемую подложкой вдоль оси, перпендикулярной плоскости монослоя. При моделировании рассматривались структуры толщиной из N атомных монослоев и линейным размером L . В плоскости пленки при моделировании были использованы периодические граничные условия и открытые граничные условия вдоль направления оси Z .

Значение обменного интеграла, определяющего взаимодействие соседних спинов внутри ферромагнитной пленки, задавалось как $J_1=1$. Температура T системы и интеграл взаимодействия между пленками J_2 измеряются при этом в единицах обменного интеграла J_1 .

В работе проводился расчет равновесных характеристик мультислойных структур, таких как намагниченность m и магнитная восприимчивость χ :

$$m(T) = 1/NL^2 \sum_i (S_i^{x^2} + S_i^{y^2} + S_i^{z^2})^{1/2},$$

$$\chi(T) = \frac{\langle m(T)^2 \rangle - \langle m(T) \rangle^2}{TNL^2}.$$

Определение значений критической температуры фазового перехода проводилось по температурным зависимостям кумулянтов Биндера

$$U_4(T) = 1/2 \left(3 - \frac{\langle m(T)^4 \rangle}{\langle m(T)^2 \rangle^2} \right).$$

Скейлинговая зависимость кумулянта

$$\frac{dU_4}{dT} = uL^{1/\nu}$$

позволяет определить температуру фазового перехода второго рода по координате пересечения температурных зависимостей $U_4(T,L)$ для различных L . На рисунке 1 в качестве примера представлены температурные зависимости $U_4(T,L)$ для системы с $N = 3$ при $A = 0,1$ и $J_2 = -0,3J_1$.

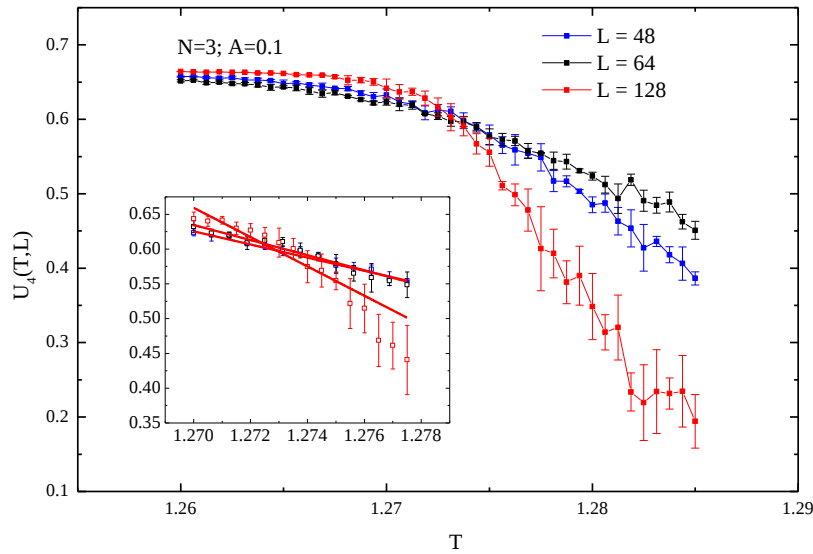


Рис. 1. Температурные зависимости кумулянтов Биндера $U_4(T,L)$ для различных размеров системы с толщиной $N = 3$ при $A = 0,1$ и $J_2 = -0,3J_1$. На вставке представлена линейная аппроксимация кумулянтов в области $T_c(N) = 1,273(2)$

В данной работе рассматривались системы с линейными размерами $L = 48, 64, 128$ с толщинами $N = 3, 6$. Были рассмотрены системы со слабой анизотропией $A = 0,1J_1$ и сильной анизотропией $A = 1,0J_1$. Параметр эффективного антиферромагнитного взаимодействия выбирался равный $J_2 = -0,3J_1$ и $J_2 = -1,5J_1$.

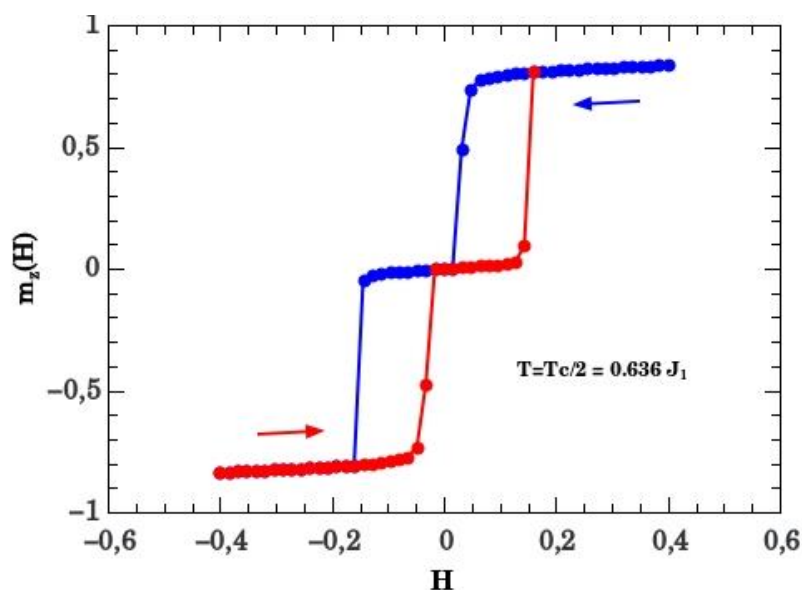


Рис. 2. Зависимость намагниченности $m_z(H)$ внешнего поля H для $N = 3, A = 0,1J_1, J_2 = -0,3 J_1$ и при температуре $T = T_c(N = 3)/2 = 0,636$

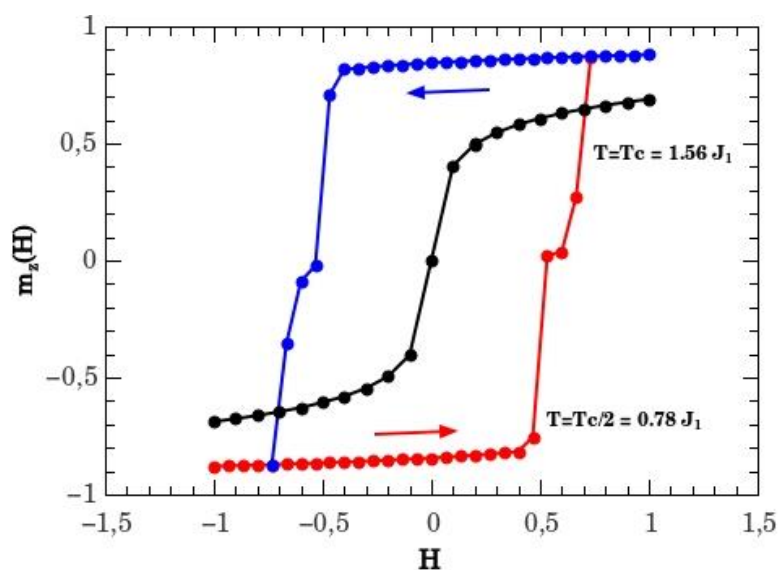


Рис. 3. Зависимость намагниченности $m_z(H)$ внешнего поля H для $N = 3, A = 1,0J_1, J_2 = -0,3 J_1$ и при $T = T_c(N, A) = 1,56$ и $T = T_c(N, A)/2 = 0,78$

На рисунке 2 представлена зависимость изменения проекции намагниченности m_z от изменения внешнего поля H для $N = 3, A = 0,1, J_2 = -0,3 J_1$ и при температуре $T = T_c(N = 3)/2 = 0,636$.

Пологие участки в $M-H$ зависимости связаны с изменением магнитного состояния мультислойной структуры. При значениях поля H больше поля насыщения H_s мультислойная

структура полностью переключает свое состояние и намагниченности слоев направлены вдоль поля.

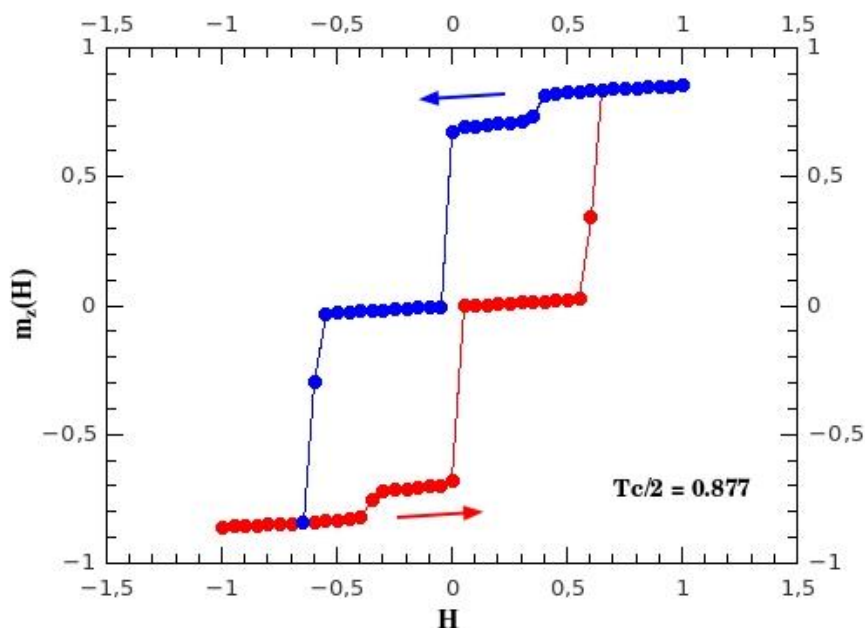


Рис. 4. Зависимость намагниченности $m_z(H)$ внешнего поля H для $N = 6$, $A = 1,0$, $J_2 = -1,5 J_1$ и при $T = T_c/2 = 0,877$

Наличие в зависимости дополнительной ступеньки на рис. 2 демонстрирует возможность переключения магнитного состояния через промежуточное состояние, когда в ферромагнитном слое сначала переориентируются спины внешнего моноатомного слоя, антиферромагнитно менее связанного, и только после этого переориентируются спины всего слоя. Как видно из рис. 3, сильная одноионная анизотропия существенно влияет на изменение магнитного состояния во внешнем поле. В случае более сильного взаимодействия между ферромагнитными пленками $J_2 = -1,5 J_1$ с толщиной $N=6$ переключение магнитного состояния происходит через несколько промежуточных состояний (Рис. 4).

Представленные в данной работе результаты исследования указывают на важность учета эффектов анизотропии и межслоевого взаимодействия при моделировании процессов быстрого переключения магнитного состояния в мультислойных магнитных структурах. Наличие промежуточных стадий при переключении оказывается ключевым моментом при проектировании устройств магнитной памяти.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект No.17-02-00279) и грантом МД-6868.2018.2 Президента РФ. Для выполнения расчетов были использованы вычислительные ресурсы ЦКП «Центр данных ДВО РАН», суперкомпьютерного комплекса МГУ им. М.В. Ломоносова и межведомственного суперкомпьютерного центра РАН.

Библиографический список

1. Apalkov D., Dieny B., Slaughter J. M., Magnetoresistive Random Access Memory // Proceedings of the IEEE. 2016. V. 104. P. 1796.
2. Прудников П. В., Прудников В. В., Медведева М. А. Размерные эффекты в ультратонких магнитных пленках // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100. С. 501–505.
3. Prudnikov P. V., Prudnikov V. V., Menshikova M. A., Piskunova N. I. Dimensionality crossover in critical behaviour of ultrathin ferromagnetic films // J. Magn. Magn. Mater. 2015. Vol. 387. P. 77–82.

ОБЗОР АКТУАЛЬНЫХ ТОПОЛОГИЙ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы выбора оптимальной схемы импульсных источников питания по критериям минимизации масса-габаритных характеристик, потерь и повышения КПД, производительности и стабилизации. Проведен анализ параметров существующих топологий импульсных источников питания. На основе представленной методики многофакторного анализа рабочих характеристик базовых топологий проведена разработка макетного образца. Представлен расчет элементов схемы и схемотехническое моделирование устройства.

Ключевые слова: импульсный источник питания, топология, моделирование.

Импульсные источники питания (ИИП) в настоящее время уверенно вошли в наш обиход взамен устаревшим линейным. Причина — свойственные данным источникам питания высокая производительность, компактность, КПД и улучшенные показатели стабилизации.

Используются они повсеместно, как в виде зарядных малогабаритных устройств для мобильной техники, так и в виде промышленных мощных комплексов источников питания. Изменениям за минувшее десятилетие подверглось множество областей. Научно-технический прогресс не обошел и радиоэлектронику с радиокомпонентами. Нововведениям подверглись информация о расчете, построении, используемых материалах. Задача моделирования импульсных источников питания с использованием новых средств становится все более востребованной в связи с переходом на более удобные, малогабаритные конструкции импульсных блоков питания, преобразователей напряжения, конвертеров, инверторов.

Тема импульсных источников питания является достаточно актуальной как одна из важнейших областей силовой электроники, которая, в то же время, имеет хорошую перспективу развития. И ее основной целью является разработка устройств питания, отвечающих современным требованиям техпроцессов, качества, материалов, минимизации массы, размеров, надежности, долговечности.

Главное решение, рассмотрению которого должно быть уделено особое внимание в начале проектирования импульсного источника питания, заключается в выборе базовой топологии. Обязательным условием для всех топологий будет наличие защиты и то, чтобы рабочее напряжение не превышало номинал напряжения отсечки стабилизатора [1].

Каждая топология имеет свои преимущества. Для любой задачи будут работоспособны более чем одна топология, но лишь один из вариантов может обеспечить наивысшие показатели характеристик и качества исполнения в соответствии с установленными условиями.

Основные факторы, определяющие оптимальный выбор топологии, должны дать ответы на следующий ряд вопросов:

- Необходима гальваническая развязка для трансформатора от входа к выходу?
- Какое напряжение появляется на первичной обмотке индуктора или трансформатора?
- Каково пиковое значение тока, идущего на ключи?
- Рабочее напряжение на ключах?

Сравнительные характеристики типовых параметров различных схмотехнических структур (топологий) ИИП с ШИМ регулированием даны в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики структур ИИП с ШИМ

Структура	Мощность, Вт	Напряжение, V_{in} , DC	Наличие изоляции	КПД, %
Buck (понижающий)	0÷1000	5÷40	Нет	78
Boost (повышающий)	0÷150	5÷40	Нет	80
Buck-boost (инвертирующий)	0÷150	5÷40	Нет	80
1T forward (прямоходовый однотранзисторный)	0÷150	5÷500	Да	78
Flyback (обратноходовой)	0÷150	5÷500	Да	80
Push-pull (пушпульный)	100÷1000	5÷1000	Да	75
Half-bridge (полумостовой)	100÷500	5÷1000	Да	75
Full-bridge (полномостовой)	400÷2000	5÷1000	Да	73

Структурные схемы без изолирующих трансформаторов используются для преобразователей, встроенных на плату. Применяются в распределенных системах питания, где напряжение промежуточной шины распределено по всей системе, и каждая плата внутри системы имеет собственные источники питания. Напряжение на шине всегда находится на безопасном уровне (по нормам технической безопасности), который считается неопасным для оператора оборудования, следовательно, диэлектрическая изоляция необязательна.

Величина напряжения на первичной обмотке трансформатора определяет, какой пиковый ток протечет через ключи. ИИП — это схемы с постоянной мощностью, поэтому, чем ниже напряжение на первичной цепи, тем выше пиковые токи для обеспечения необходимой выходной мощности. При больших токах сбойные режимы ключей становятся неуправляемыми, и устройства питания трудно защитить. При использовании другой структуры пиковые токи можно уменьшить.

Чем больше максимальное напряжение, поданное на ключи, тем больше вероятность того, что они выйдут за пределы своих областей устойчивой работы. Внутри ИИП распространены всплески напряжения, и вероятность превышения лимита напряжения лавинного пробоя ключа становится ощутимой. Что касается схемы с изолирующим трансформатором, промышленное производство распределено по структурной схеме, в зависимости от различных диапазонов выходной мощности (рис. 1).

Для мощностей до 150 Вт лидирующей является обратноходовая топология, благодаря малому числу компонентов и высокому КПД. Но, так как ее пиковые токи намного более высокие, чем у прямоходовых преобразователей, она достигает пределов в области устойчивой работы ключей при более низкой выходной мощности [2].

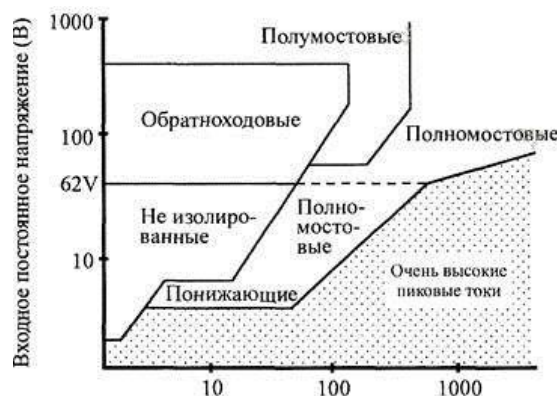


Рис. 1. Многофакторный анализ рабочих характеристик структур ИИП

При выходной мощности от 150 до 500 Вт лидирующей становится полумостовая (half-bridge) структура. В полумостовом преобразователе в первичном контуре на обмотку подается половина входного напряжения, из-за чего пиковые токи довольно терпимы. По этой причине такая технология позволяет получить только до 500 Вт мощности.

При мощностях, превышающих 500 Вт и до нескольких киловатт, используется полномостовая (full-bridge) структура. Для ее реализации требуются четыре ключа, два из которых имеют "плавающие" схемы управления, при таком уровне выходной мощности дополнительные усложнения схемы. В том же диапазоне мощностей можно использовать push-pull структуру, но ее особенностью является потенциально серьезное состояние отказа, называемого разбалансировкой сердечника (core imbalance). Такое состояние достигается, когда магнитный поток внутри трансформатора имеет характеристики, асимметричные относительно точки равновесия. Это приведет к насыщению трансформатора в направлении одного из ключей и его выгоранию в течение нескольких наносекунд, когда в нагрузке проявятся ступенчатые изменения. Для избегания этой проблемы стоит использовать метод межимпульсной токовой защиты с управлением по напряжению или по току.

В процессе работы для более детального разбора процесса разработки ИИП проводились расчеты на структурном уровне, выбор элементов и разработка принципиальной электрической схемы, схемотехническое моделирование, анализ метрологических характеристик. Характеристики взяты для решения наиболее популярных задач: выходное напряжение, регулируемое 10-15 В; коэффициент полезного действия более 80 %; работа на нагрузку с током вторичных цепей 40 А; питание блока от источника переменного тока 50 Гц, 160-255 В.

После рассмотрения вышеназванных структур выбор был сделан в пользу полумостовой структуры. Она наиболее удовлетворяет стандартные решения технических задач на разработку ИИП 500 Вт, поскольку имеет высокий КПД и обеспечивает мощность в широком динамическом диапазоне. Кроме того, такая схема позволяет построить адаптивную систему, где на выходе с вторичной обмотки трансформатора мы можем получить любое напряжение.

На рисунке 2 приведена функциональная схема импульсного блока питания. Рассмотрим подробно каждый элемент данной схемы.

Синфазный фильтр (1) — нужен для защиты от помех сети и бытовых приборов, которые генерирует блок питания. Также он оберегает и наш блок от помех, приходящих из сети [3]. Дежурное питание (2) на микросхеме TOP227. Схема с добавлением гальванической развязки от сети через оптрон. Выход будет реализован в виде 2-х развязанных друг от друга обмоток с напряжением 15 В и 1 А каждая. Одна для питания ШИМ контроллера корректора (5), вторая - ШИМ контроллера полумоста (7).

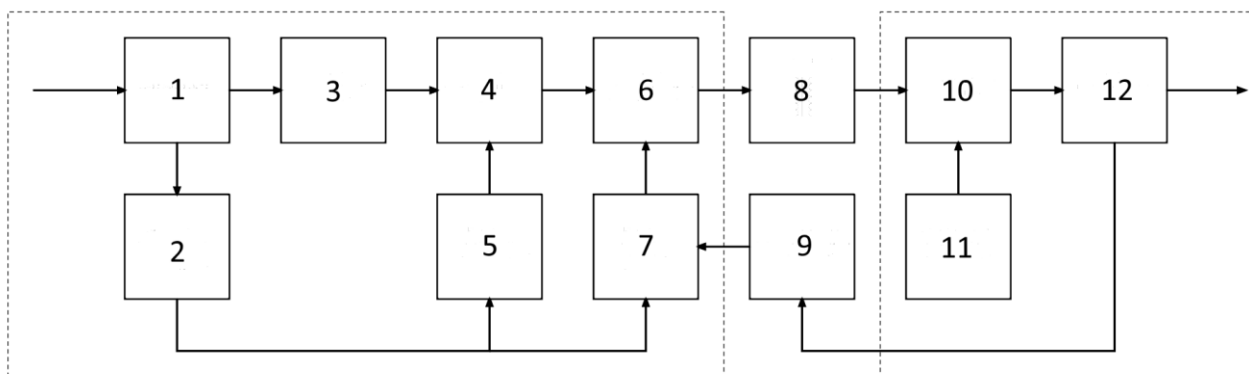


Рис. 2. Функциональная схема ИИП

Выпрямитель (3), выполнен на диодном мосте. ККМ (4) - активный корректор мощности на микросхеме ICE2PCS01. Это бустерный преобразователь для обеспечения низкого входного напряжения, способного стабильно выдавать 380 В и равномерно получать мощность из сети. Преобразователь напряжения (6) реализован по топологии «полумост». Контроллер полумоста (7) реализован на микросхеме TL494. Силовой трансформатор (8) реализуется на сердечнике компании Epcos типа ETD44/22/15 из материала N95. Гальваническая развязка (9) для обратной связи исполнена на оптронах PC817. Выпрямитель (10) на вторичной обмотке на сдвоенных диодах Шоттки. Датчик тока (11) AC758. LC-контур (12) на выходе, уменьшит пульсации тока и позволит «срезать» все гармоники. Последняя проблема крайне актуальна при питании устройств, работающих в радиочастотном диапазоне и имеющих в своем составе высокочастотные аналоговые цепи.

ExcellentIT - Расчет импульсного трансформатора двухтактного преобразователя (Версия 9.1)

Показать схемы преобразования и выпрямления | Помощь | О программе... | Размер окна программы

Входные данные

Амплитуда индукции, максималная, Т: 0.136

Частота преобразования, кГц: 100

Рабочее время (duty cycle), макс.: 0.45 ☒ TL494 и т.п. ☐ IR2153 и т.п.

Мертвое время (dead time), мксек: 0.500

Сопротивление канала Rds(on), Ом: 0.45 ☒ Rds(on) ☐ Унас.

Напряжение насыщения Uнас., В: 1.714

Коэффициент заполнения окна: 0.3

Плотность тока, А/мм²: 8

Питание (мин., ном., макс.), В: 370 380 390

☒ DC ☐ AC

Инициализация...

Выходные характеристики преобразователя

Стабилизация выходов: ☒ Есть ☐ Нет

	1	2	3	4	5
Номинальное напряжение, В	15				
Номинальный ток, А	40				
Минимальный ток, А	1				
Падение на диодах, В	0.7				
Диаметр провода (желаемый), мм	0.8	0.8			

Однополярн. со средней точкой: ☒ ☐ ☐ ☐ ☐

Выпрямление: Двухполярн. со средней точкой: ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Мостовое: ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

☐ Использовать желаемые диаметры проводов

Схема преобразователя

☐ Пуш-пул ☒ Полумостовая ☐ Мостовая

Результаты расчета

Габаритная мощность трансформатора: 1673.2 Вт

Потребляемая нагрузкой мощность: 600.0 Вт

Мощность потерь в магнитопроводе: 2.290 Вт

Коэффициент заполнения окна: 0.115

Индуктивность первичной обмотки: 1.536 мГн

Ток намагничивания первичной обмотки: 0.268 А

Амплитуда тока первичной обмотки: 4.078 А

Ток потребления (по шине DC): 1.674 А

Число витков первичной обмотки: 21

Число витков вторичной обмотки расчетное: 20.54

Диаметр провода первичной обмотки: 0.56 мм

Число проводов в первичной обмотке: 2

Плотность тока в первичной обмотке: 7.236 А/мм²

Допустимый диаметр проводов не более: 0.6 мм

Напряжение питания: мин. 0.113 ном. 0.113 макс. 0.113

Амплитуда индукции, Т: 0.450 0.438 0.426

Коэффициент заполнения импульса: 0.450 0.438 0.426

Выходные характеристики преобразователя

	1	2	3	4	5
Число витков	2+2				
Число витков расчетное	2.00				
Диаметр провода	0.56				
Число проводов	14				
Плотность тока, А/мм ²	7.943				

Минимальное напр., В: 15.0

Номинальное напр., В: 15.0

Максимальное напр., В: 15.0

Минимальная ампл., В: 17.46

Номинальная ампл., В: 17.93

Максимальная ампл., В: 18.41

Индукт. дросселя, мГн: 4.9

Сердечник

ETD 44/22/15

Материал: N87 Epcos

Форма: ☐ E ☐ EI ☐ ER ☒ ETD ☐ R ☐ Другая

Размеры сердечника: А, мм В, мм С, мм D, мм H, мм h, мм I, мм

А, мм	В, мм	С, мм	D, мм	H, мм	h, мм	I, мм

Данные сердечника:

Эффективная проницаемость: 1650

Длина средней линии сердечника, le: 103 мм

Площадь сечения сердечника, Ae: 173 мм²

Площадь окна сердечника, Ap: 210 мм²

Объем сердечника, Ve: 17.819 см³

☐ Добавление в базу (ввод размеров)

☐ Добавление в базу (ввод данных)

Добавить сердечник в базу

Загрузить | Сохранить | Рассчитать | Выход

Рис. 3. Результат расчета трансформатора для полумоста

Для расчетов трансформатора (рис. 3) использовалось программное обеспечение «ExcellentIT 9.1». Среди основных возможностей программного обеспечения ExcellentIT можно отметить расчет потребляемой и габаритной мощностей трансформатора, мощности потерь в магнитопроводе, перегрева магнитопровода, КПД, токов намагничивания первичной обмотки и её индуктивности, токов потребления, количества витков обмоток и размеров проводов с учетом скин-эффекта. Программа также определяет индуктивность демодулирующего дросселя в схемах преобразователя.

Схемотехническое моделирование (рис. 4) проводилось в программе Altium Designer, являющейся комплексной системой автоматизированного проектирования (САПР) радиоэлектронных средств [4].

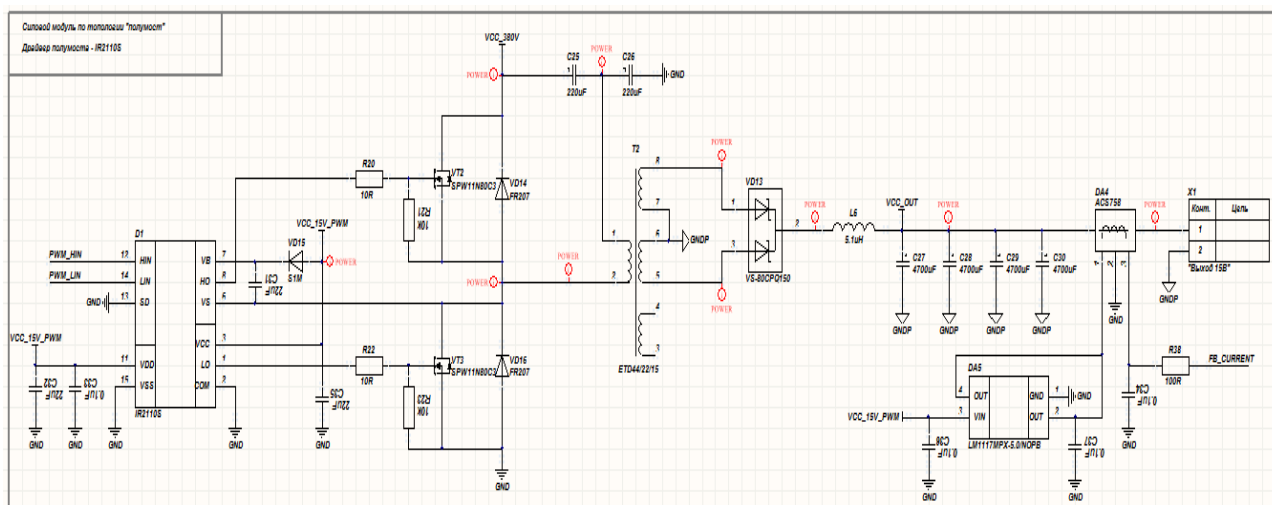


Рис. 4. Схема полумостового преобразователя напряжения

В результате макетного моделирования был получен импульсный блок питания на топологии полумоста: входное напряжение сети 160-255 В АС, выходное постоянное напряжение 15 В, ток на нагрузку 40 А, частота встроенного генератора ШИМ контроллера 100 кГц, первичные и вторичные обмотки гальванически развязаны, значение суммарного КПД более 80%.

Библиографический список

1. Brown M. Power Supply Cookbook. Second Edition. – Boston: Elsevier Newnes, 2001. 280 p.
2. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. 2-е издание. М.: Солон-Пресс, 2015. 416 с.
3. Жданкин В.П. Подавление электромагнитных помех во входных цепях преобразователей постоянного напряжения / Компоненты и технологии. 2016. № 11. С. 86–98.
4. Никонов А. В., Никонова Г. В. Моделирование в электротехнике, электронике и схемотехнике. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 128 с.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИТИПОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Аннотация. Карбид кремния (SiC) считается одним из наиболее перспективных материалов для применения в силовой электронике. Электрофизические свойства SiC позволяют изготавливать на его основе мощные электронные приборы, устойчивые к воздействию радиации и высоких температур. На значения электрофизических параметров SiC оказывает существенное влияние ряд факторов, одним из которых является температура. В статье представлены температурные зависимости ширины запрещенной зоны, собственной концентрации носителей заряда, подвижности электронов и подвижности дырок для трех политипов SiC (3C, 4H и 6H), получивших наиболее широкое распространение в электронике. Зависимости построены на основе анализа и обобщения данных, приведенных в специальной литературе и периодических изданиях. Анализ полученных графиков показал, что с ростом температуры монотонно возрастает ширина запрещенной зоны и собственная концентрация носителей заряда. Подвижность носителей находится под существенным влиянием концентрации донорных и акцепторных примесей, и ее температурные зависимости описываются более сложными кривыми. Характер изменения электрофизических свойств свидетельствует о том, что при нагреве электронных приборов, изготовленных на основе 3C-, 4H- и 6H-SiC, следует ожидать увеличения электропроводности, снижения пробивного напряжения и ухудшения частотных свойств.

Ключевые слова: карбид кремния, подвижность электронов, подвижность дырок, собственная концентрация носителей заряда, температурные зависимости, ширина запрещенной зоны.

Наиболее востребованным в электронике полупроводниковым материалом является кремний [1]. Однако он имеет существенные ограничения в области высоковольтных, высокотемпературных и высокочастотных приложений [2]. В подобных областях находят применение полупроводники, обладающие широкой запрещенной зоной.

Перспективными широкозонными материалами считаются карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN). Они обладают выдающимися свойствами и являются коммерчески доступными. GaN считается более подходящим для использования в высокочастотных приборах, предназначенных для работы при напряжениях до 1...2 кВ и токах до 10 А, в то время как SiC является перспективным для применения в силовой электронике.

В настоящее время известно более 200 политипов карбида кремния [3], имеющих кубическую, гексагональную и ромбическую структуру решетки. Наиболее востребованными в электронике являются политипы 3C, 4H и 6H [3]. Так, на основе 4H-SiC изготавливаются силовые и высокочастотные приборы. Технология 4H-SiC достаточно хорошо развита. В настоящее время коммерчески доступными являются пластины диаметром до 150 мм [4]. 3C-SiC также находит применение в силовой электронике. Его основное преимущество перед другими политипами заключается в относительно низкой стоимости производства, обусловленной возможностью гетероэпитаксиального роста на поверхности Si [5]. Сообщается о получении 3C-SiC пластин диаметром 150 мм [3]. Основной областью применения 6H-SiC является твердотельная оптоэлектроника. Данный политип совместно с GaN используется при производстве светодиодов [3]. Другие политипы карбида кремния представляют меньший интерес. Например, свойства 15R-SiC делают его перспективным

материалом для применения в силовой электронике, однако коммерчески доступные пластины 15R-SiC большого диаметра и достаточно высокого качества изготовить пока не удается [2].

Одним из важнейших электрофизических параметров полупроводникового материала является ширина запрещенной зоны E_g , оказывающая непосредственное влияние на максимальное рабочее напряжение V_b изготавливаемых приборов. Другими важными параметрами являются собственные концентрации носителей заряда $n_i = p_i$, подвижность электронов μ_n и подвижность дырок μ_p , определяющие удельную электропроводность σ нелегированного материала.

Значения основных электрофизических параметров наиболее востребованных в электронике политипов карбида кремния, измеренные при температуре 300 К, представлены в таблице 1 [3].

Таблица 1

Значения основных электрофизических параметров SiC (при 300 К)

Параметр	3C-SiC	4H-SiC	6H-SiC
Ширина запрещенной зоны, E_g , эВ	2,29	3,20	3,00
Собственная концентрация носителей заряда, n_i , см^{-3}	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$
Подвижность электронов, μ_n , $\text{см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$	800	1000	600
Подвижность дырок, μ_p , $\text{см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$	40	115	100

Следует отметить, что значения электрофизических параметров, приводимые в различных источниках, существенно отличаются друг от друга. Так, для 4H-SiC в работах [2] и [1] приводятся значения подвижности электронов μ_n , равные 400 и 1020 $\text{см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ соответственно. Согласно [4], собственной концентрации носителей заряда n_i соответствует значение $\sim 1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-3}$. Кроме того, в работе [1] указывается ширина запрещенной зоны E_g , равная 3,26 эВ, что также несколько отличается от E_g , приведенной в [3]. Данные отличия обусловлены влиянием на электрофизические свойства материала большого числа факторов, таких как концентрация примесей и степень легирования [5, 6].

Электрофизические параметры определяют области применения рассматриваемых политипов. 4H-SiC характеризуется наибольшей шириной запрещенной зоны E_g , что позволяет изготавливать на его основе полупроводниковые приборы, обладающие высоким пробивным напряжением V_b [4, 1]. Благодаря своим свойствам данный политип является наиболее подходящим для применения в силовой электронике [5, 3]. 3C-SiC обладает меньшей шириной запрещенной зоны, однако имеет ряд преимуществ. Стоимость производства 3C-SiC ниже, чем 4H и 6H политипов. Это обусловлено возможностью гетероэпитаксиального роста 3C-SiC на поверхности Si. Данный процесс происходит при меньших температурах, чем гомоэпитаксиальный рост 4H-SiC [5]. Другим преимуществом 3C-SiC является относительно низкая плотность дефектов на границе SiO_2/SiC [5]. Это имеет существенное значение при производстве МОП-приборов, так как влияет на подвижность носителей заряда обоих типов. 6H-SiC применяется главным образом в качестве подложки для гетероэпитаксиального выращивания GaN при производстве светодиодов [3]. Кристаллические решетки данных материалов являются хорошо совместимыми, что позволяет получать GaN структуры с низкой плотностью дефектов и большим значением квантового выхода.

Значения электрофизических параметров, представленных в таблице 1, существенно зависят от температуры. Характер этих зависимостей имеет большое значение при проектировании полупроводниковых приборов [5]. На основе анализа и обобщения данных, приведенных в специальной литературе и периодических изданиях, были построены температурные зависимости основных электрофизических параметров 3C-, 4H- и 6H-SiC.

Температурные зависимости ширины запрещенной зоны E_g представлены на рисунке 1. Графики для 3C-, 4H- и 6H-SiC построены на основе экспериментальных данных, приведенных в работах [5], [4] и [7] соответственно.

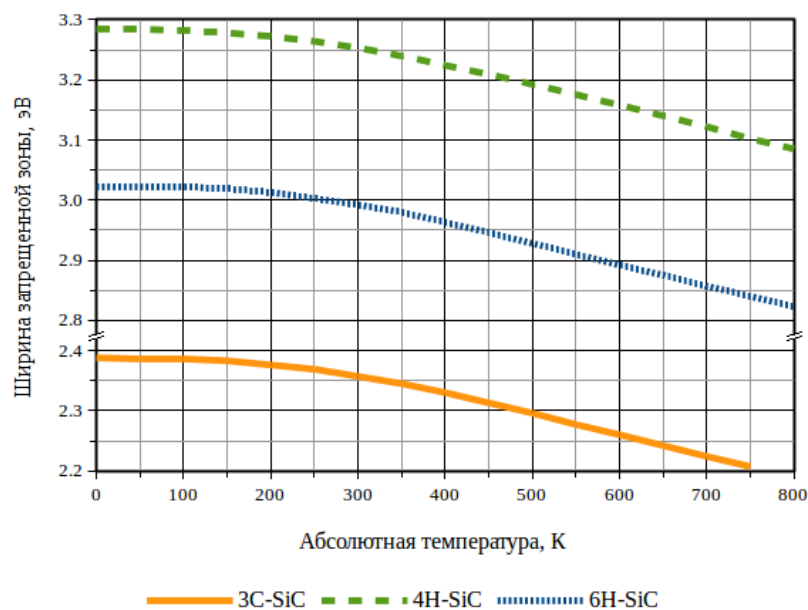


Рис. 1. Температурные зависимости ширины запрещенной зоны

Температурные зависимости собственной концентрации носителей заряда n_i представлены на рисунке 2. Графики зависимостей построены на основе данных, приведенных в работе [4].

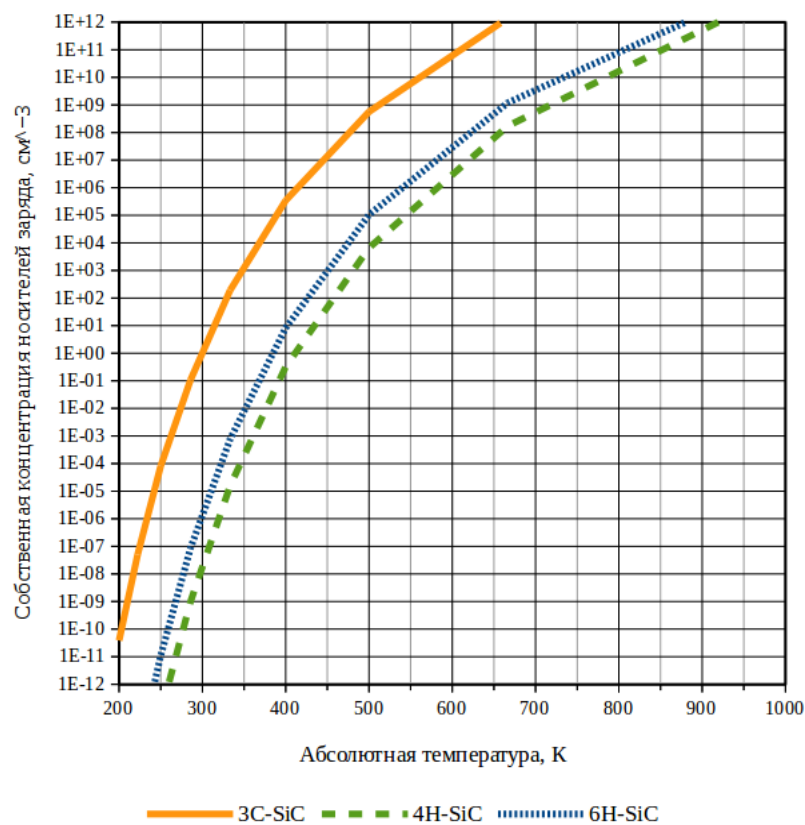


Рис. 2. Температурные зависимости собственной концентрации носителей заряда

Температурные зависимости подвижности электронов μ_n представлены на рисунке 3. Графики для 3C-, 4H- и 6H-SiC построены на основе экспериментальных данных, приведенных в работах [5], [6] и [8] соответственно. Образец 3C-SiC, использовавшийся при эксперименте, не был легирован и характеризовался концентрацией электронов n_0 , равной $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (при 300 K). Исследованные образцы 4H- и 6H-SiC были легированы донорами с концентрациями N_d $7,51 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (4H-SiC) и $1,46 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (6H-SiC).

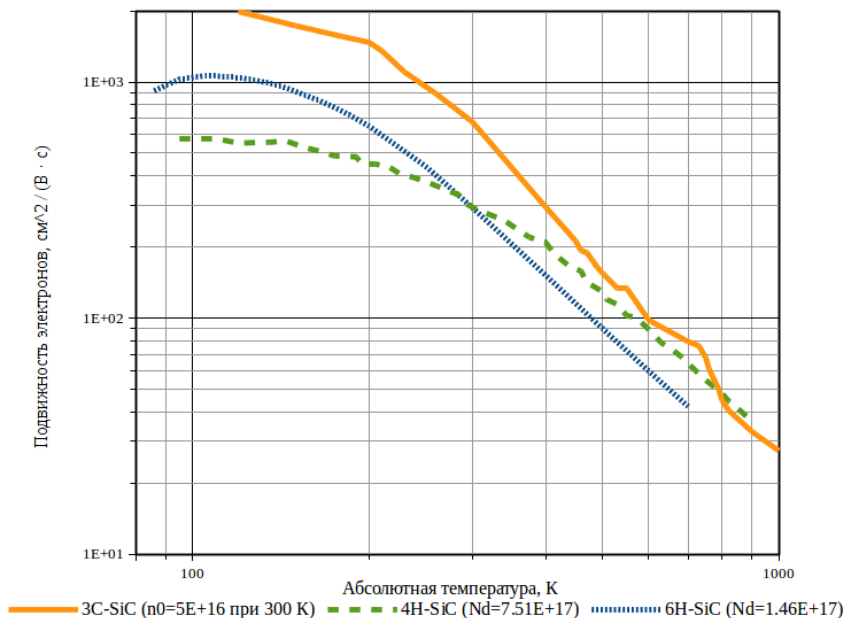


Рис. 3. Температурные зависимости подвижности электронов (концентрации в см^{-3})

Температурные зависимости подвижности дырок μ_p представлены на рисунке 4. Графики для 3C-, 4H- и 6H-SiC построены на основе экспериментальных данных, приведенных в работах [5], [6] и [9] соответственно. В исследованиях использовались образцы 3C-SiC с концентрациями акцепторов N_a и доноров N_d , соответственно равными $5,5 \cdot 10^{18}$ и $3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 4H-SiC с концентрацией акцепторов N_a $1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и 6H-SiC с концентрациями $N_a = 2,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $N_d = 0,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

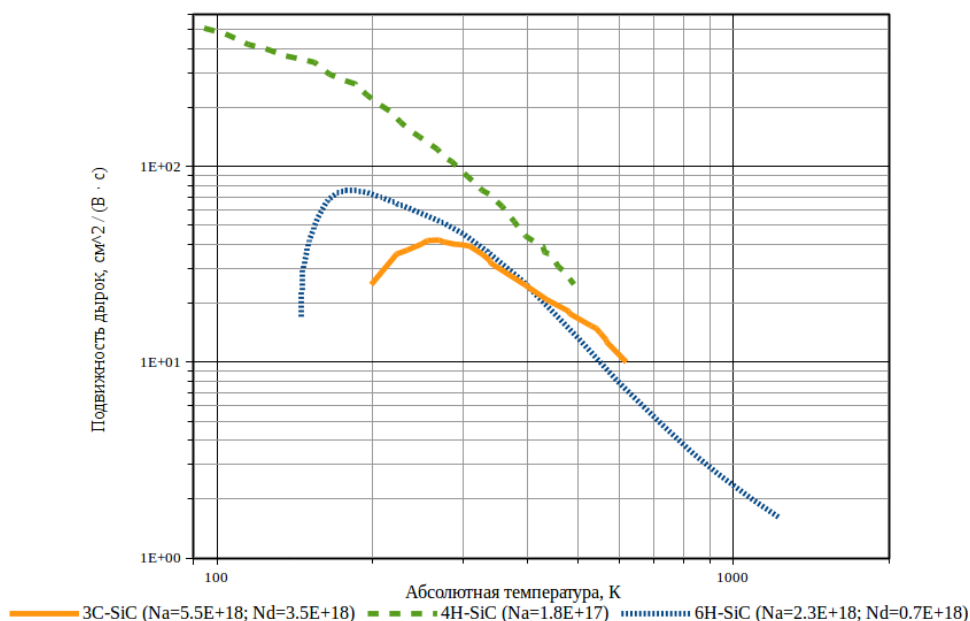


Рис. 4. Температурные зависимости подвижности дырок (концентрации в см^{-3})

Анализ температурных зависимостей, представленных на рисунках 1...4, позволяет сделать следующие выводы.

1. Ширина запрещенной зоны E_g стремится к максимальному значению при приближении температуры к абсолютному нулю и монотонно снижается при нагреве материала. В широком диапазоне температур данная зависимость близка к линейной. При изменении температуры от 0 до 750 К ширина запрещенной зоны всех рассмотренных политипов SiC уменьшается на 0,18 эВ. Основной вклад в данные изменения вносит температурная зависимость электрон-фононного взаимодействия. Менее значительными факторами являются сглаживания периодического потенциала и тепловое расширение кристаллической решетки. Так, в работе [10] отмечается, что вклад теплового расширения в полную вариацию E_g составляет ~25%. Уменьшение ширины запрещенной зоны SiC с ростом температуры приводит к снижению пробивного напряжения V_b приборов, изготовленных на его основе.

2. Собственная концентрация носителей заряда n_i в исследуемом диапазоне монотонно возрастает. Данные изменения обусловлены обратной зависимостью между n_i и E_g . Таким образом, повышение n_i при нагреве SiC объясняется действием вышеописанных механизмов, оказывающих влияние на E_g . С ростом температуры увеличение n_i происходит значительно быстрее снижения μ_n и μ_p . Таким образом, при нагреве всех рассмотренных политипов SiC следует ожидать монотонного увеличения их электропроводности σ .

3. Подвижность электронов μ_n и дырок μ_p существенно зависит не только от температуры, но и от степени легирования материала. Наименее легированным образцам (3C на рис. 3, 4H на рис. 4) свойственно снижение μ_n (μ_p), пропорциональное $T^{-1,5}$, что характерно для собственных полупроводников. Снижение температуры приводит к повышению вероятности рассеяния носителей заряда на атомах и ионах примесей. Данный эффект оказывает существенное влияние на форму температурных зависимостей подвижностей μ_n и μ_p образцов с относительно высокими концентрациями доноров и акцепторов. Монотонное снижение подвижности носителей всех рассмотренных политипов, наблюдающееся, по крайней мере, при температурах, превышающих 100...300 К, позволяет ожидать ухудшения частотных свойств данных материалов при их нагреве.

Библиографический список

1. Kimoto T. Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices // Japanese Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 54, no. 4. 27 p. DOI:10.7567/JJAP.54.040103.
2. Wellmann P. J. Power electronic semiconductor materials for automotive and energy saving applications — SiC, GaN, Ga₂O₃, and diamond // Journal of Inorganic and General Chemistry. 2017. Vol. 643, no. 21. P. 1312–1322. DOI:10.1002/ZAAC.201700270.
3. Sadow S. E. Silicon carbide biotechnology: a biocompatible semiconductor for advanced biomedical devices and applications. Amsterdam: Elsevier, 2016. 380 p.
4. Hatakeyama T., Fukuda K., Okumura H. Physical models for SiC and their application to device simulations of SiC insulated-gate bipolar transistors // IEEE Transactions on Electron Devices. 2013. Vol. 60, no. 2. P. 613–621. DOI:10.1109/TED.2012.2226590.
5. Arvanitopoulos A., Lophitis N., Gyftakis K. N., Perkins S., Antoniou M. Validated physical models and parameters of bulk 3C–SiC aiming for credible technology computer aided design (TCAD) simulation // Semiconductor Science and Technology. 2017. Vol. 32, no. 10. 13 p. DOI:10.1088/1361-6641/AA856B.
6. Stefanakis D., Zekentes K. TCAD models of the temperature and doping dependence of the bandgap and low field carrier mobility in 4H-SiC // Microelectronic Engineering. 2014. Vol. 116. P. 65–71. DOI:10.1016/J.MEE.2013.10.002.

7. Choyke W. J. Optical properties of polytypes of SiC: interband absorption, and luminescence of nitrogen-exciton complexes // Materials Research Bulletin. 1969. Vol. 4. P. S141–S152. DOI: 10.1016/B978-0-08-006768-1.50018-8.

8. Barrett D. L., Campbell R. B. Electron mobility measurements in SiC polytypes // Journal of Applied Physics. 1967. Vol. 38, no. 1. P. 53–55. DOI:10.1063/1.1709008.

9. Van Daal H. J., Knippenberg J. D., Wasscher J. D. On the electronic conduction of α -SiC crystals between 300 and 1500°K // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 1963. Vol. 24, no. 1. P. 109–127. DOI:10.1016/0022-3697(63)90046-5.

10. Varshni Y. P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors // Physica. 1967. Vol. 34, no. 1. P. 149–154. DOI:10.1016/0031-8914(67)90062-6.

УДК 612.741.1

А.А. Кабанов, А.И. Щелканов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА БИОФИЗИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Аннотация. Статья посвящена моделированию и процессам обработки ЭМГ-сигналов. Сформулированы основные предпосылки к созданию системы принятия решения о помощи пациенту на основе автоматизированного анализа полученных данных объективного контроля. В работе изучаются основные вопросы моделирования биофизических сигналов, а также их получение и дальнейшая обработка.

Ключевые слова: электромиография, мониторинг, пЭМГ, фильтр, вейвлет.

Электромиограмма является разновидностью биологического сигнала тела человека, отражающей электрическую активность скелетных мышц. На практике используют сигнал, полученный при помощи поверхностных электродов, так называемый сигнал пЭМГ.

Сигнал поверхностной электромиограммы широко используют для разработки методик подготовки спортсменов, диагностики нейромышечных заболеваний, а также применяют для управления электромеханическими протезами. Управление протезами при помощи сигнала пЭМГ происходит с низким соотношением сигнал/шум, чему способствуют такие факторы, как влияние шумов от промышленной частоты 50 Гц и ее гармонических составляющих. Для удаления шумов из исходного сигнала пЭМГ преимущественно применяется цифровая фильтрация полосовым (Bandpass) и решетчатыми фильтрами (lattice network), однако такая фильтрация искажает сигнал, так как часть полезной информации сигнала пЭМГ теряется.

Анализ существующих научных работ показывает, что более эффективным методом удаления артефактов из биомедицинских сигналов является применение вейвлет-анализа сигнала, коррекция результата разложения и восстановление сигнала с целью удаления из него шумов и помех [1].

Для построения модели сигнала электромиограммы была использована программная среда разработки LabView от компании National Instruments. Данная среда удобна, имеет простой интерфейс, легка в освоении, а также обладает необходимым функционалом для разработки подобных задач. Также кроме самой LabView были использованы дополнительные модули расширения Biosignal Toolkit и Advanced Signal Processing Toolkit. На рисунке 2 представлено окно настройки генератора сигнала электромиографии [2,3].

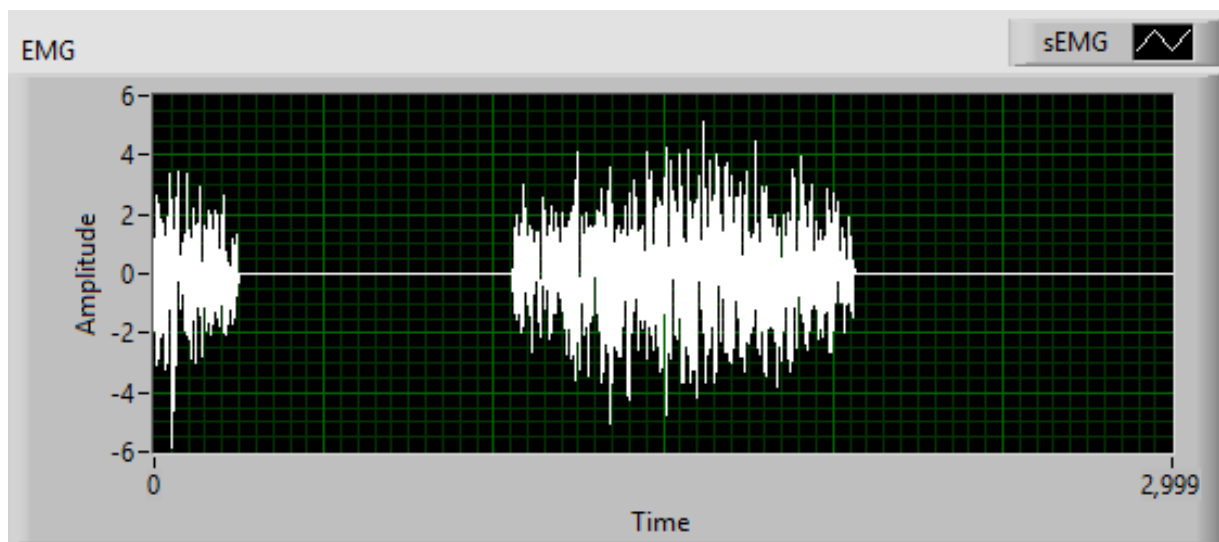


Рис.1- модель сигнала электромиограммы без шумов

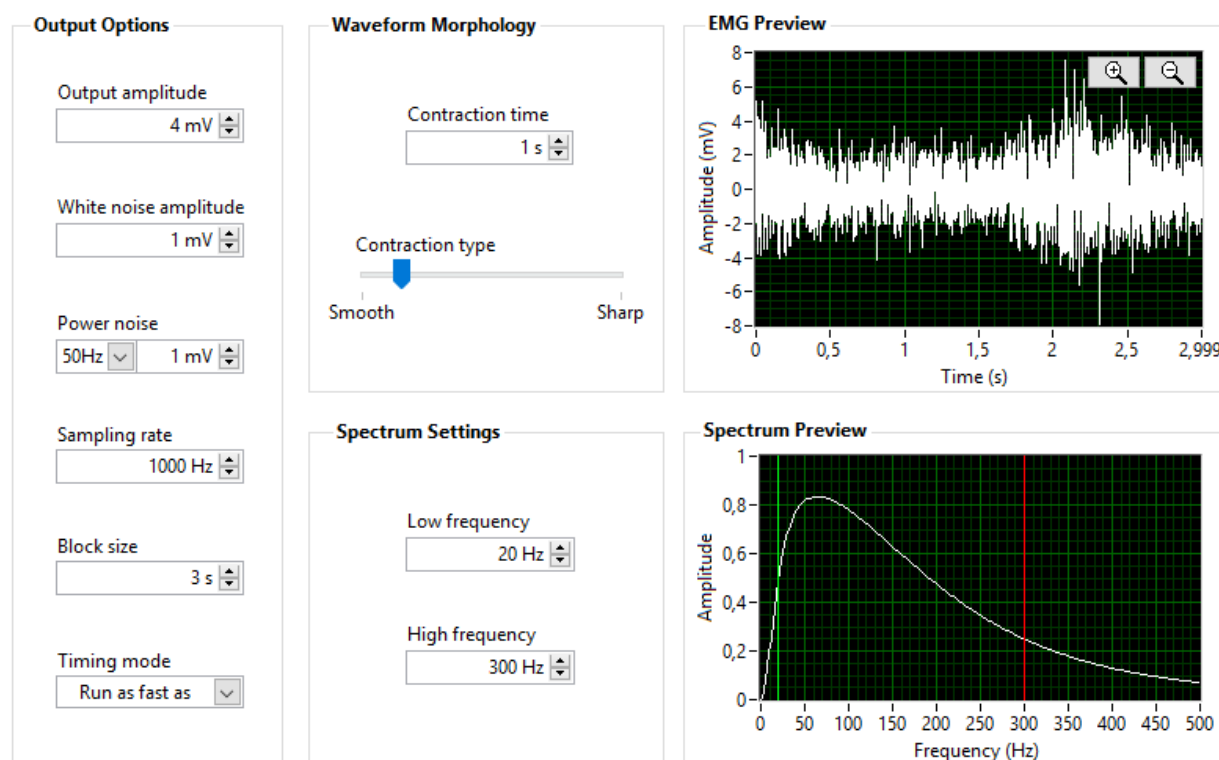


Рис. 2. Окно настройки генератора сигнала ЭМГ

Построенная модель сигнала ЭМГ имеет необходимую точность и близость к оригиналу, и может быть проанализирована с помощью различных методов фильтрации. Также в существующей модели есть возможность искусственно изменять влияние помех, таких как белый шум и шумы от электрической сети частотой 50 Гц [4].

Библиографический список

1. Яшин А. А. Онтогенез жизни и эволюционная биология / Предисл. В. П. Казначеева. М.: Издательство ЛКИ, 2007. 240 с.

2. Федосов В. П., Нестеренко А. К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW. М.: ДМК Пресс., 2007. 456 с.
3. Раздел на сайте National Instruments. URL: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/211023> (дата обращения: 13.04.2018).
4. Рангайян Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход. М.: Физматлит, 2007. 440 с.

УДК 621.317.328

А.С. Колмогоров, С.С. Колмогорова, С.В. Бирюков
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ГРАДИЕНТОМ НАПРЯЖЕННОСТИ

Аннотация. В статье рассматривается возможность измерения показателя степени неоднородности электрического поля в математической модели работы многокомпонентных сенсоров электромагнитных полей. Полученный корректирующий коэффициент находится в промежутке от 0 до 1 как граничные случаи различной степени неоднородности. В результате появляется возможность обоснованных решений для улучшения метрологических параметров универсальных сенсоров, учитывающих градиент неоднородности напряженности электромагнитного поля.

Ключевые слова: электрометрия, неоднородность, градиент напряженности, изотропные измерения, электромагнитное поле, сенсор, приборостроение.

Анализ научно-технической и патентной литературы, проведенный с начала семидесятых годов прошлого века, показал практическое отсутствие информации по вопросу количественной оценки степени неоднородности электромагнитных полей [1]. В основном в технической литературе используются качественные оценки неоднородности поля. Например: однородное поле, неоднородное поле, поле с высокой степенью неоднородности, слабо неоднородное поле и другие. Несмотря на это, были выявлены публикации с попытками количественной оценки неоднородности электромагнитных полей [2-5].

Исследование степени неоднородности электромагнитного поля предполагает ее оценку. Эта оценка необходима для установления зависимостей и определения применимости существующих и разрабатываемых сенсоров при исследованиях параметров электромагнитных полей. Количественная оценка степени неоднородности позволит выявить информативные параметры, необходимые при проектировании новых сенсоров.

Согласно расположенным чувствительным элементам сенсора (рис. 1) в пространстве электромагнитного поля на выходах дифференциального преобразователя и сумматора возникают переменные напряжения, пропорциональные соответственно разности и сумме полных потоков вектора напряженности электрического поля, замыкающихся на открытых поверхностях чувствительных элементов [2, 5].

В реальных условиях [6] носители зарядов распределены по поверхностям различных форм, так что при одном и том же расстоянии между высоковольтными электродами - источниками поля - и точкой измерения «пространственное изменение» градиента потенциала всегда будет меньше, чем в поле точечного заряда (рис. 2).

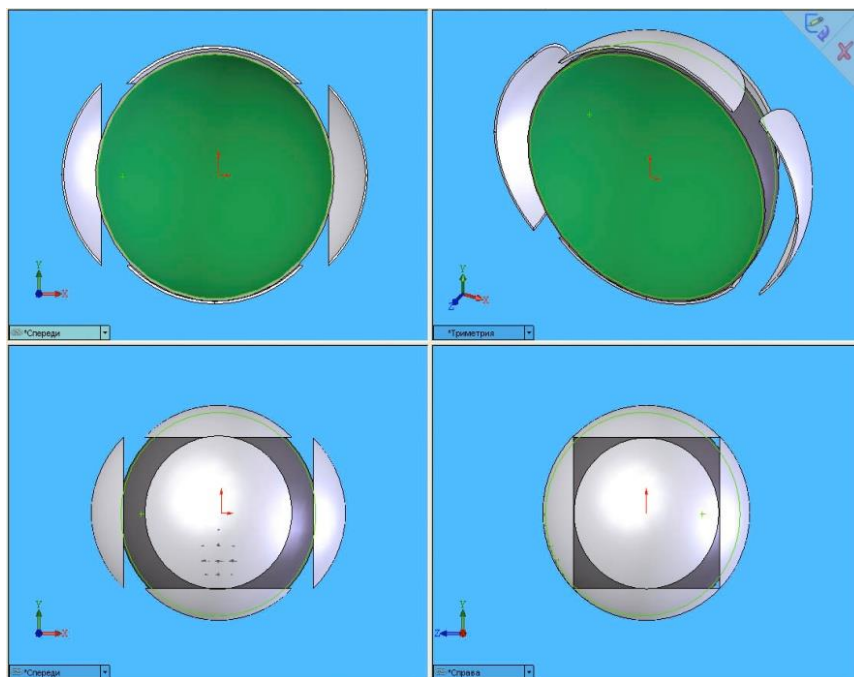


Рис. 1. Многокомпонентный датчик напряженности электрического поля с дифференциально расположенными электродами в виде сферических сегментов, радиуса R

Выражение для степени неоднородности поля получили в [7]:

$$\eta = \left| \frac{\Delta E}{E} \right| = \frac{4a}{(1-a^2)^2} \cdot \quad (1)$$

где η - степень неоднородности электрического поля в процентах; $a = R/d$ - параметр, оценивающий близость центра исследуемого объема к источнику поля; где R - эквивалентный радиус пространства исследуемого объема поля (на рис.2 этот объем выделен пунктиром).

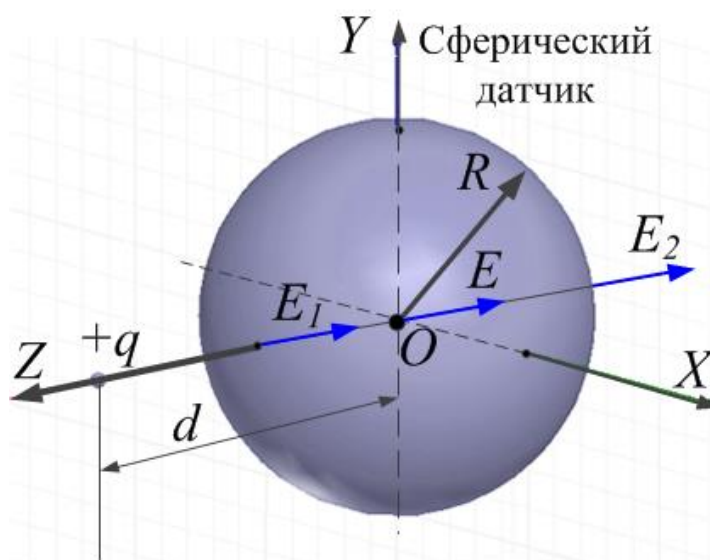


Рис. 2. Пояснения к выводу математического выражения для измерения степени неоднородности электрического поля

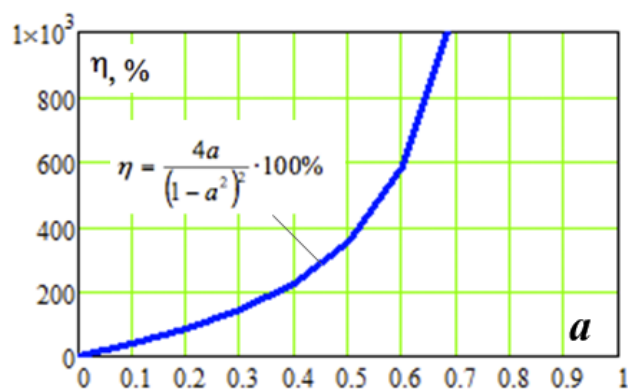


Рис. 3. График зависимости степени неоднородности поля от параметра a

График зависимости степени неоднородности поля от параметра a по формуле (1) представлен на рисунке 3. По графику видно, что почти до $a=0.2$ степень неоднородности в исследуемом объеме поля достигает приблизительно 100%. Далее по мере приближения к источнику поля степень его неоднородности резко возрастает и уже при $a=0.7$ достигает 1000 %.

Таким образом, задача исследования неоднородности поля и его количественная оценка актуальна. Решение такой задачи позволит грамотно использовать уже существующие сенсоры и приборы на их основе, а также позволит модернизировать старые и создать новые сенсоры, учитывающие неоднородность исследуемых полей.

Библиографический список

1. Росстандарт. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. URL: <http://www.fundmetrology.ru/> (дата обращения: 02.04.2017).
2. Бирюков С. В. Метод измерения степени неоднородности электрического поля // Методы и средства измерений: Материалы третьей Всерос. науч.-техн. конф. / Межрегиональное Верхне-Волжское отделение Академии технологических наук РФ (МВВО АТН РФ). Нижний Новгород, 2001. С.31–32.
3. Biryukov S. V. The device for measurement of intensity of an electrical field and degree of its heterogeneity / 2002 6-th International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings APEIE-2002 / IEEE Catalog Number 02EX546. NSTU. Novosibirsk, 2002. V. 1. P. 110–111.
4. Бирюков С. В. Прибор для измерения напряженности электрического поля и степени его неоднородности / Материалы VI Междунар. конф. актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2002 / IEEE Catalog Number 02EX546. НГТУ. Новосибирск, 2002. Т. 3. С.111–112.
5. Свидетельство на полезную модель № 21308 РФ, МКИ G 01 R 29/08. Устройство для измерения параметров электрического поля / С.В. Бирюков. Оpubл. 10.01.2002, Бюл № 1.
6. Kolmogorov A. S., Kolmogorova S. S., Biryukov S. V. Operational circumstances in the design and use of invariant of electromagnetic fields // Proceedings: XI International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines» (Dynamics 2017). Omsk, 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239464
7. Колмогорова С. С., Колмогоров А. С., Бирюков С. В. Измерение степени неоднородности электрического поля // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 45–48. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-45-48

Д.В. Лазарев, Н.Н. Ковалев¹, А.И. Щелканов¹

АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения», г. Омск, Россия

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОЛЬЖЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. Представлен цифровой измеритель скольжения асинхронного электродвигателя. Основой измерителя является микроконтроллер, дополненный специализированным аналого-цифровым преобразователем. Результаты измерений индицируются на жидкокристаллическом символьно-цифровом дисплее. Основная относительная погрешность среднеквадратических значений скольжения не превышает 0,25 %, а погрешность измерения активной мощности, напряжения и тока не превышает 0,5 % при коэффициентах мощности 1, +0,5 и минус 0,866.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, скольжение, аналого-цифровой преобразователь, микроконтроллер, жидкокристаллический дисплей.

В настоящее время асинхронные электрические двигатели повсеместно применяются практически во всех сферах жизни. Эффективность, качество и безопасность работы электродвигателей напрямую зависят от их электрических параметров, весьма значимым из которых является скольжение [1].

Скольжение влияет на большинство основных параметров электродвигателя и является величиной, характеризующейся разностью скоростей вращения магнитного поля статора и ротора асинхронного двигателя.

Именно в силу приведенного изучения способов построения высокоточных и быстродействующих автоматических устройств измерения скольжения является весьма актуальной задачей [2].

На рисунке 1 приведена структурная схема измерителя, реализующая метод измерения разности периодов [3].

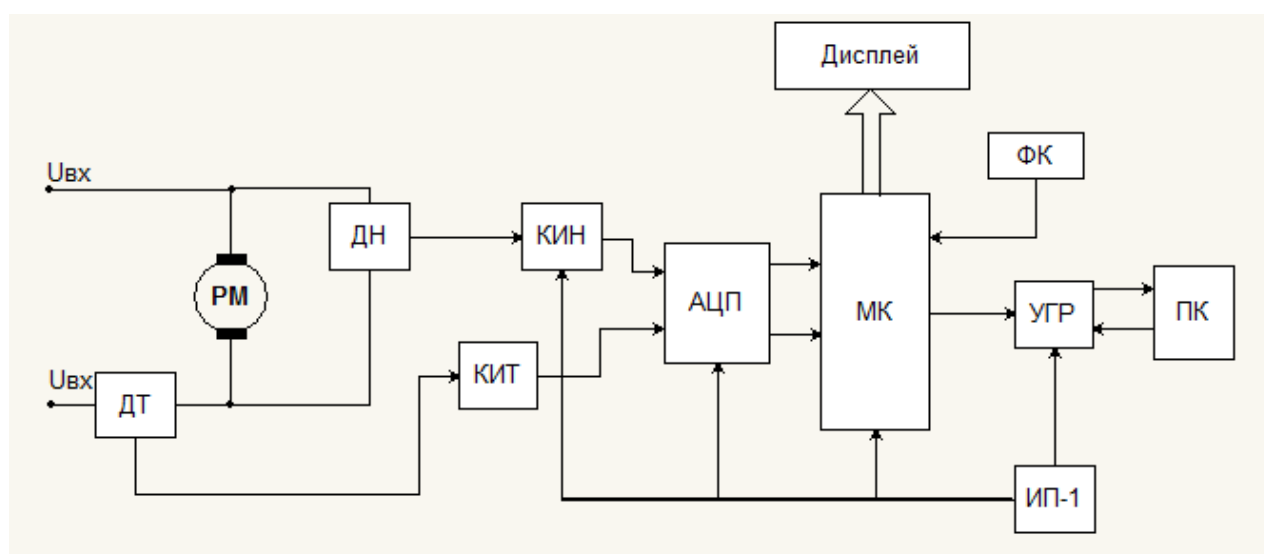


Рис.1. Структурная схема цифрового измерителя скольжения

Схема содержит:

Электрический двигатель (РМ);
Датчик измерения тока (ДТ);
Датчик напряжения (ДН);
Канал измерения напряжения (блоки ДН и КИН);
Канал измерения тока (блоки ДТ и КИТ);
Аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
Микроконтроллер (МК);
Жидкокристаллический символьно-цифровой дисплей;
Функциональная клавиатура (ФК);
Узел гальванической развязки (УГР);
Источник питания (ИП1).

Инкрементный энкодер, тактильные кнопки выполняют функции оперативного управления в соответствии с заранее запрограммированными функциями, в число которых входят организация меню и выбор требуемых рабочих параметров.

В предложенном цифровом измерителе скольжения использование цифрового формата представления данных дает ряд преимуществ [4]. Сводится к минимуму влияние электромагнитных помех на измерения [5]. Уменьшается количество соединений на печатной плате и необходимое количество выводов управляющего микроконтроллера, что обеспечивает теоретическую возможность значительного расширения функциональных возможностей прибора. Измеритель отличается простотой программной реализации обмена данными, так как в большинстве современных микроконтроллеров используемые интерфейсы реализованы аппаратно.

Результаты тестов подтвердили корректность теоретических предпосылок. Основная относительная погрешность среднеквадратических значений скольжения не превышает 0,25 %, а погрешность измерения активной мощности, напряжения и тока не превышает 0,5 % при коэффициентах мощности 1, +0,5 и минус 0,866, что обеспечивает эффективное использование данного прибора для решения многих практических инженерных задач.

Библиографический список

1. Лейтман М. Б. Автоматическое измерение выходных параметров электродвигателей (методы и аппаратура). М.: Энергоатомиздат, 1983. 152 с.
2. ГОСТ Р 51317.4.7–2008. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. М.: Стандартинформ, 2009. 54 с.
3. Лейтман М. Б. Измерительный преобразователь разности двух частот в напряжение постоянного тока // Изв. вузов. Приборостроение. 1974. № 10. С. 16–19.
4. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы / 5-е изд., перераб. и доп. К.: Вища. шк. Головное изд-во, 1986. 504 с.
5. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах / пер. с англ. М.: Мир, 1979. 318 с.

Д.В. Лазарев, К.В. Мироненко, С.И. Тюлева, А.И. Щелканов¹

АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения», г. Омск, Россия

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ С УЗЛАМИ КОРРЕКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Аннотация. Рассмотрены основные методы управления корректорами коэффициента мощности. Проведен анализ режимов работы выбранных методов. Сформулированы требования к измерительной аппаратуре.

Ключевые слова: Корректор коэффициента мощности, ККМ, контроль параметров.

Реактивная нагрузка в практически любой системе распределения энергии вызывает появление фазовых сдвигов между током и напряжением, что влечет за собой потери, обусловленные реактивной составляющей мощности. Действительно, несовпадение векторов тока и напряжения приводит не только к энергетическим потерям, но и к генерированию высших гармоник в элементах системы электропитания, вызывающих некорректное функционирование подключенных к системе устройств [1].

При обеспечении синфазности колебаний тока и напряжения имеет место концентрация всей мощности в основной частоте, при этом амплитуды гармоник стремятся к нулю. Режим коррекции коэффициента мощности (ККМ) обеспечивает управление током таким образом, чтобы он совпадал с напряжением по форме и фазе, способствуя повышению извлекаемой из источника доступной активной мощности за счет преобразования реактивной составляющей нагрузки в активную.

К настоящему времени наибольшее распространение получили схемы корректоров на основе повышающего преобразователя напряжения, при этом по режиму работы индуктора ККМ имеют либо прерывистый режим работы, либо непрерывный режим работы [2].

На основании анализа режимов работы дросселя можно выделить несколько методов управления корректорами коэффициента мощности, важнейшими из которых являются метод «граничного» управления, метод управления по пиковому значению тока, метод управления по среднему значению тока и метод разрывных токов с использованием ШИМ [3].

На рис. 1 приведена структурная схема ККМ, реализующая метод управления по среднему значению тока, к преимуществам которой следует отнести постоянство частоты переключения, режим непрерывных токов и высокую устойчивость к коммутационным помехам. К сожалению, схема весьма сложна в реализации и требует введения датчика тока с высокими метрологическими характеристиками в цепь дросселя, при этом имеет место «жесткое» закрытие диода.

На рис. 2 приведена структурная электрическая схема ККМ на основе метода разрывных токов с использованием широтно-импульсной модуляции. К несомненным преимуществам данной структуры следует отнести постоянство как частоты переключения, так и постоянство времени нахождения ключа в открытом состоянии. Кроме упомянутого, схема имеет простой в реализации алгоритм ШИМ-управления и «мягкое» переключение силового диода.

Очевидно, что режим прерывистых токов в сочетании с не всегда приемлемыми массогабаритными характеристиками фильтра ограничивают область применения.

При оценке метрологических характеристик измерительных устройств необходимо учитывать весьма высокую частоту коммутации силового ключа, достигающую значений в

93

Вопросы исследования данного типа устройств с позиции обеспечения требований по электромагнитной совместимости [4-6] предполагают создание измерительной аппаратуры, что представляет несомненный научный интерес.

Библиографический список

1. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. 632 с.
2. Мелешин В. И., Овчинников Д. А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011. 576 с.
3. Чаплыгин Е. Е. Однофазные корректоры коэффициента мощности. М.: Изд.-во МЭИ, 2006. 35 с.
4. ГОСТ Р 513.18.14.1 – 2006. Радиопомехи промышленные. Нормы и методы измерений (ЭМС). М.: Издательство стандартов, 2007.
5. ГОСТ Р 513.17.3.2 – 2006. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы измерений (ЭМС). М.: Издательство стандартов, 2007.
6. ГОСТ Р 513.17.6.2-2007 (МЭК 61000-6-2:2005) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах. Требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 2008.

УДК 621.311.62

Д.В. Лазарев, К.В. Мироненко, Ю.А. Фоминых¹, А.И. Щелканов¹

АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения», г. Омск, Россия

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Аннотация. Рассмотрены основные схемотехнические аспекты построения устройств контроля параметров импульсных источников питания, проведен анализ существующих методик и алгоритмов обработки измерительных сигналов датчиков напряжения и тока, сформулированы основные подходы к измерителю, создана электрическая структурная схема измерителя.

Ключевые слова: источник вторичного электропитания, преобразователь напряжения, аналого-цифровой преобразователь, микроконтроллер, цифровая обработка сигнала, датчик тока, датчик напряжения, среднеквадратичное значение.

На фоне прогресса в радиоэлектронике и автоматике происходит стремительное развитие преобразовательной техники, в том числе и импульсных источников вторичного электропитания, к которым предъявляются весьма жесткие требования к качественным показателям выходного напряжения [1]. Измерительные приборы, используемые в настоящее время, имеют крайне высокую стоимость или не соответствуют современным метрологическим нормам. В силу отмеченного, наряду с развитием и совершенствованием вторичных источников электропитания весьма актуальной является задача создания

интегрированных в структуру источников питания средств контроля и измерения электрических параметров [2].

На рис. 1 приведена схема электрическая структурная измерителя параметров источников вторичного электропитания.

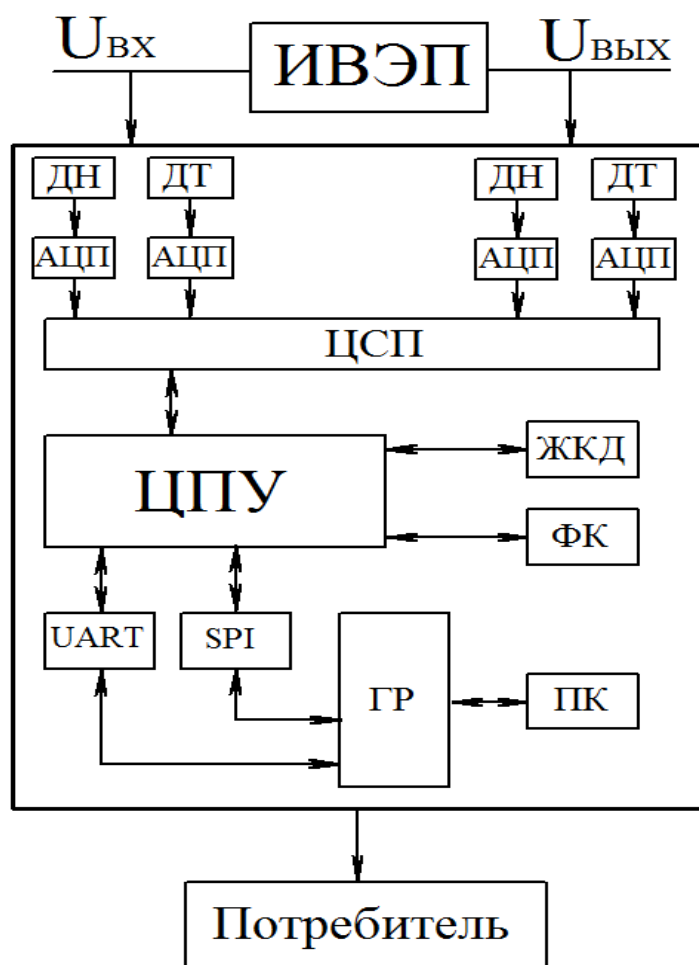


Рис. 1 Структурная схема измерителя

Структурная схема содержит:

ИВЭП - Источник вторичного электропитания;

ДН - Датчик напряжения;

ДТ - Датчик тока;

АЦП - Аналого-цифровой преобразователь;

ЦСП - Цифровой сигнальный процессор;

ЦПУ - Центральное процессорное устройство;

ЖКД - Жидкокристаллический дисплей;

ФК - Функциональная клавиатура;

SPI - Последовательный периферийный интерфейс;

UART - Универсальный асинхронный приемопередатчик;

ГР - Гальваническая развязка;

ПК - Персональный компьютер;

Основу измерительного и вычислительного ядра схемы ЦСП составляет микросхема, содержащая три основанных на принципе сигма-дельта модуляции прецизионных аналого-цифровых преобразователя и высокоскоростное одноканальное ядро.

ЦСП тактируется резонатором «часового» типа частотой 32768 Гц, для обеспечения конечной тактовой частоты 16 МГц служит интегрированный узел фазовой автоподстройки частоты.

Для программирования предусмотрена гальваническая развязка, которая обеспечивает высокоскоростной информационный обмен между гальванически развязанными устройствами и обеспечивает защиту программиста от возможного поражения электрическим током, а также повышение помехозащищенности прибора в целом.

Учитывая то, что в схеме выполняется измерение весьма малых сигналов, для повышения помехозащищенности измерений организовано две земли: аналоговая земля и цифровая земля. При этом напряжение питания цифровых элементов отделено от напряжения питания аналоговых элементов по переменному току за счет дросселя [3].

Входы АЦП через резисторы с квазиулевым сопротивлением подключены к делителям напряжения, которые реализованы на прецизионных резисторах поверхностного монтажа с номинальным значением температурного коэффициента сопротивления $9...12 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$. Потенциальные выводы шунта подключаются к выводам АЦП, что обеспечивает дифференциальный режим работы АЦП токового канала, этим достигается значительное снижение помех. Измерение выходных параметров тока и напряжения реализовано на базе прецизионной измерительной микросхемы.

Дополнительный вход ЦПУ может использоваться для дальнейшего расширения функциональных возможностей данного измерителя, например, в части методов и средств технической диагностики. При необходимости проведения отладки данная схема поддерживает отладку по одному проводу.

В процессе были рассмотрены основные аспекты построения устройств контроля параметров импульсных источников питания, проведен анализ существующих методик и алгоритмов обработки измерительных сигналов датчиков напряжения и тока, сформулированы основные подходы к разработке, созданы электрические структурная и принципиальная схемы устройства, осуществляющего получение и обработку измерительной информации с последующим взаимодействием с ЭВМ по гальванически развязанной реализации интерфейса SPI. Разработана топология печатной платы и изготовлен макет прибора. Произведена программная проверка соответствия разработанной топологии электрической принципиальной схеме.

Проведены тестовые испытания макета устройства на лабораторном стенде. Проведено тестирование макета устройства и печатных плат на возможность формирования цифрового потока данных. Проведены тесты по сопряжению интерфейсов макета и ПК по последовательному высокоскоростному порту USB. Проведена проверка технологического и сервисного программного обеспечения, обеспечивающего подключение макета устройства к ПК и считывание с изделия данных в цифровом виде.

Библиографический список

1. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. 632 с.
2. Данилов А. Современные промышленные датчики тока / Современная электроника. 2004. № 1. С. 26–35.
3. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах / пер. с англ. М.: Мир, 1979. 318 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕСТОВЫХ ФОРМ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ ПО ФИЗИКЕ

Аннотация: Данная статья посвящена использованию компьютерного тестирования для контроля и оценки знаний студентов технического вуза в рамках лабораторного практикума по дисциплине «Физика». Описывается опыт применения тестовой формы контроля, рассматриваются ее преимущества и недостатки. Анализируются трудности, связанные с использованием компьютерного тестирования, и проводится поиск возможных путей их преодоления.

Ключевые слова: лабораторный практикум, тестовые задания, тестирование, компьютерное тестирование, формы контроля знаний.

Введение новых государственных стандартов в области высшего образования и обновленных учебных планов сопровождается внедрением инноваций как в содержание учебных дисциплин, так и в методические формы организации учебного процесса [1, 2]. Инновации в области методики преподавания физики сопряжены с активным использованием информационных технологий, в частности, с применением компьютерного тестового контроля знаний. При изучении дисциплины «Физика» в техническом вузе текущему контролю усвоения знаний и контролю остаточных знаний отводится существенная роль, поскольку физика является базой для дальнейшего изучения специальных технических дисциплин.

Под тестовым заданием можно понимать изменяющуюся по элементам содержания и по трудности единицу контрольного материала в форме утвердительного или вопросительного предложения с одним или несколькими неизвестными. Тестовое задание можно считать качественным, если его содержание соответствует контролируемой дидактической единице, не может быть истолковано двояко и эффективнее других форм контроля проверяет уровень подготовленности обучающихся.

У тестовой формы контроля знаний имеются свои преимущества и недостатки в сравнении с традиционными формами – устным и письменным опросами. При использовании устного или письменного опроса значительно увеличивается нагрузка на студентов и преподавателей и продолжительность времени сдачи отчетности. В то же время применение тестов позволяет значительно сократить время на их выполнение и проверку, повысить объективность оценки и снизить нагрузку на преподавателя, особенно при использовании компьютеров. Среди достоинств тестового контроля знаний студентов можно также выделить: широкий спектр знаний, доступных для проверки и контроля; индивидуальность заданий и потенциальная самостоятельность их выполнения; высокая производительность процедуры контроля.

У тестового контроля есть и негативные аспекты, среди которых можно выделить следующие: в некоторых случаях не вполне объективный характер оценки знаний в связи с вероятностной выборкой вопросов; отсутствие проверки и развития навыков устного и письменного изложения информации.

Поэтому внедрение компьютерных тестов возможно лишь после тщательного анализа потенциала этой формы контроля знаний в зависимости от содержания материала дисциплины «Физика» и структуры построения учебного процесса.

Целесообразность применения тестовых методик в лабораторном практикуме обусловлена тем, что он является неотъемлемой частью учебного процесса, а успешная отчетность по выполненным лабораторным работам является допуском к итоговому контролю знаний студентов в текущем семестре – зачету или экзамену.

Варьирование типов заданий позволяет гибко проверять различные знания, умения и навыки студента. Наиболее часто используемые типы заданий: тестовые задания с выбором одного правильного ответа из нескольких предложенных, тестовые задания с выбором нескольких верных утверждений из ряда предложенных, задания открытого типа, позволяющие дать на поставленный вопрос развернутый ответ в свободной форме.

На кафедре физики УГАТУ в течение ряда лет используется компьютерное тестирование в лабораторном практикуме. Преподавателями кафедры физики создается база тестовых заданий к каждой лабораторной работе, предусмотренной рабочими программами дисциплины «Физика», разработанными на основе ФГОС ВО.

Специфика лабораторного практикума по физике, как и специфика методов преподавания и оценивания результатов обучения, накладывают ряд требований к используемому программному обеспечению. Программное обеспечение, прежде всего, должно поддерживать возможности ввода и вывода символьной, формульной и графической информации. Также оно должно поддерживать возможность делать выборку из банка однотипных заданий по заданным параметрам. Последнее особенно важно при большом количестве студентов в учебной подгруппе, так как при практически одновременной защите лабораторных работ у каждого студента должен быть свой вариант заданий. Необходимо также учитывать студентов, которые не сумели защитить лабораторную работу в надлежащий срок и пришли на повторную защиту.

В настоящее время существует немало разработанных тестовых программных продуктов (MyTest, OpenTest, TestSystem и др.) [3] достаточно высокого качества. Но у них есть несколько недостатков, одним из которых является стоимость продукта. Однако цена – не самый существенный недостаток. Гораздо важнее то, что многие платные программные продукты не поддерживают возможность использования банка однотипных заданий, и, как следствие, в них невозможно создать многовариантные тестовые задания по одной и той же лабораторной работе.

В связи с этим на кафедре физики для контроля знаний студентов по лабораторному физическому практикуму используется программа компьютерного тестирования «Конструктор тестов» [4]. На наш взгляд, это наиболее оптимальная программа компьютерного тестирования, которая обладает следующими преимуществами:

1) поддерживает пять типов вопросов, что позволяет проводить любые тесты, такие как

- выбор единственно правильного ответа;
- выбор нескольких возможных правильных ответов;
- установка последовательности правильных ответов;
- установка соответствий ответов;
- ввод ответа вручную с клавиатуры;

2) возможность:

- задавать вопросы в произвольном порядке;
- задавать цену каждому вопросу в баллах;
- ограничить тестирование по времени;
- установить разные права доступа к редактированию базы данных в "Редакторе" для разных пользователей;

3) вопросы могут содержать изображения, музыку, звуки, видеоролики (файлы jpg, bmp, ico, emf, wmf, mp3, wav, mid, kmi, avi).

На рис. 1. представлен фрагмент теста по лабораторной работе №1 «Определение момента инерции тела методом трифилярного подвеса».

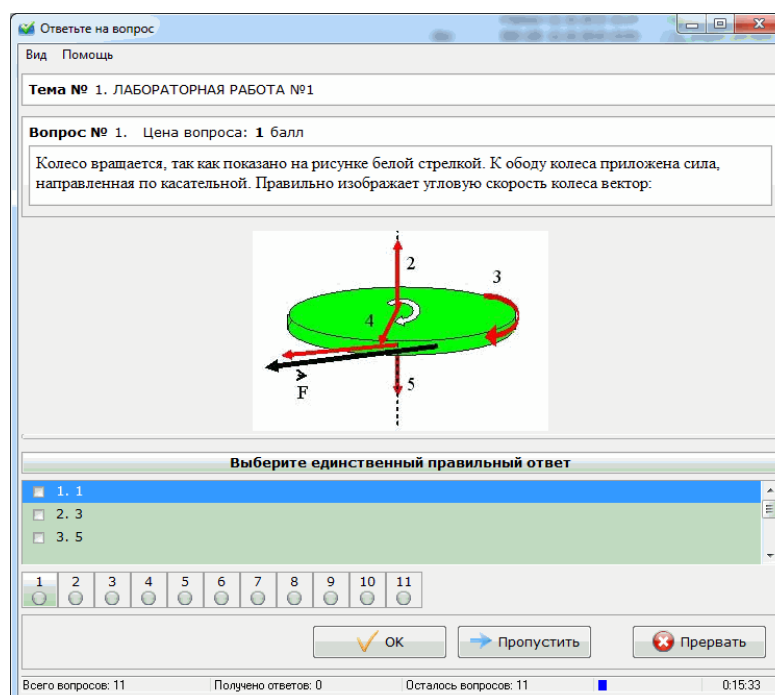


Рис. 1. Один из вопросов компьютерного теста к лабораторной работе №1

Проанализировав опыт использования компьютерного тестирования, можно утверждать, что студент, прошедший компьютерное тестирование (не менее 6 раз за семестр), лучше подготовлен к сдаче семестрового зачета или экзамена, поскольку тестирование позволяет ему точно определить свои пробелы в знаниях и ликвидировать их к итоговому контролю. По оценке преподавателей, компьютерное тестирование существенно облегчает работу по контролю знаний студентов и позволяет больше уделять времени контролю над выполнением эксперимента в лабораторном практикуме.

Библиографический список

1. Шишкин Ф. Т., Шишкина А. Ф. Реализация компетентностного подхода в высшем профессиональном образовании // Современные проблемы науки и образования в техническом вузе: материалы II Международной научно-практической конференции (25-27 июня 2015 года, г. Стерлитамак). Ч. 2. / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 2015. С. 190–195.
2. Шишкин Ф. Т., Шишкина А. Ф. Компетентностный подход в высшем профессиональном образовании // Современные проблемы науки и образования в техническом вузе: материалы Всероссийской научно-практической конференции (24-26 июня 2013 года, г. Стерлитамак) / УГАТУ. Уфа, 2013. С. 283–288.
3. Кулаков П. А., Шишкина А. Ф., Афанасенко В. Г. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации / Уфимск. гос. нефтяной техн. ун-т. Стерлитамак: Изд-во «ФОБОС», 2015. 195 с.
4. Лазарев В. В. Контроль знаний студентов по лабораторному физическому практикуму с помощью программы «Конструктор тестов» // Проблемы современного физического образования: Материалы III Всероссийской научно-методической конференции / отв. ред. М. Х. Балапанов. РИЦ БашГУ. Уфа, 2015. С.181–182.

ДИАГНОСТИКА СФОРМИРОВАННОСТИ КОГНИТИВНЫХ КЛЮЧЕВЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ У СТУДЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ ФИЗИКЕ

Аннотация. В статье обсуждаются содержательно-дидактический и процессуальный аспекты диагностики сформированности когнитивных ключевых компетенций у студентов младших курсов вузов в процессе обучения физике. Приводятся процедура, средства, результаты оценивания и динамика сформированности логических приемов мышления и рефлексии как наблюдаемых элементов когнитивных ключевых компетенций студентов.

Ключевые слова: когнитивные ключевые компетенции, микроструктура компетенций, наблюдаемые элементы, процедура оценивания.

Контент-анализ ФГОС ВО по направлениям подготовки, реализующимся на физическом факультете классического университета, а также в технических вузах, показал, что выпускник каждого направления должен обладать определенным набором общепрофессиональных и профессиональных компетенций, включающих в себя когнитивную составляющую. Проблема оценивания уровня сформированности когнитивных ключевых компетенций у студентов является актуальной в двух аспектах: содержательно-дидактическом и процессуальном.

Содержательно-дидактический аспект отражает результат оценивания – распределение студентов по уровням сформированности когнитивных ключевых компетенций, то есть, в конечном счете, по степени готовности к освоению программ высшего профессионального образования. Наши исследования показывают, что у студентов младших курсов вузов уровень сформированности рассматриваемых компетенций неуклонно снижается. Процессуальный аспект предусматривает построение процедуры оценивания указанных компетенций.

С содержательно-дидактических позиций к когнитивным ключевым компетенциям относятся логические и эвристические приемы мышления, а также методологические компетенции. Нами построена микроструктура этих компетенций, а также определены основания и признаки уровней их сформированности у обучающихся [1, 2]. В процессуальном аспекте полагаем, что процедура оценивания компетенций должна иметь аналитико-синтетический характер: в процессе анализа микроструктуры компетенций выделяются наблюдаемые элементы, которые доступны оцениванию; разрабатываются средства и методики оценивания, позволяющие отнести студента к тому или иному уровню сформированности проверяемого элемента; проводится диагностика; интерпретируются результаты. На этапе интерпретации проводится синтез: интегрируются частные показатели уровня сформированности отдельных наблюдаемых элементов компетенции, и делается вывод о сформированности компетенции в целом. Одним из наблюдаемых элементов когнитивных ключевых компетенций является применение студентом логических приемов мышления в процессе решения задач по физике. Владение этими приемами и рефлексией является необходимым компонентом готовности студента к освоению программ высшего профессионального образования. Поэтому представляет интерес оценить начальный уровень сформированности логических приемов и рефлексии у студентов первого курса.

Приведем результаты констатирующего этапа эксперимента с участием студентов первого курса физического факультета ОмГУ. В качестве методов диагностики применялись

тестирование на первом и втором уровнях усвоения предметного материала (по классификации В.П. Беспалько), пооперационный анализ работ и наблюдение.

При разработке тестовых заданий, выявляющих уровень сформированности основных логических приемов мышления и рефлексии, мы руководствовались принципами системности, микроструктурного анализа деятельности и множественности представления информации [1].

Студентам первого курса физического факультета ОмГУ на первом в семестре практическом занятии по механике (по молекулярной физике) предлагались тестовые задания. Здесь представлен пример одного варианта теста по молекулярной физике.

Задание 1. Установите связи и отношения между понятиями: закон Бойля-Мариотта, изопроцесс, изобара, закон, изотермический процесс, изохора, процесс, изотерма, изобарический процесс, изохорический процесс, кривая на координатной плоскости.

Задание 2. Идеальный газ совершает термодинамический цикл (в варианте приводится рисунок цикла в параметрах (P, V)). Постройте этот же цикл в параметрах (V, T) и (P, T). Объясните полученные графики.

Задание 3. Идеальный газ совершает процесс по закону $PV^4 = \text{const}$.

А) Как изменится температура газа, если увеличить его объем в 4 раза?

Б) Как изменится температура газа, если уменьшить его объем в 2 раза?

Студенты письменно выполняют это задание по вариантам, при этом преподаватель просит их подробно объяснять свои действия.

Микроструктурный анализ деятельности студентов при выполнении задания показывает, что оно требует применения элементарного анализа (деления термодинамического цикла на участки), реляционно-логического анализа (установления связей и отношений между понятиями и физическими величинами, а также между предметной информацией в вербальной, графической и аналитической формах представления), обобщения (способности распознавать процессы, образующие термодинамический цикл), синтеза (объединения участков графика в цикл, формулировки вывода об изменении искомого параметра состояния), классификации (выявления основания классификации и родо-видовых отношений между термодинамическими понятиями), рефлексии (способности осознать и объяснить свои действия). Таким образом, поэлементный и пооперационный анализ работ студентов давал возможность проверять, кроме предметного и операционального слоёв, еще и рефлексивный слой познавательной деятельности.

Нами было выделено четыре уровня сформированности логических приёмов у испытуемых: нулевой, низкий (локально-предметный), средний (локально-операциональный), высокий (осознанно-операциональный) [1].

Для определения уровня сформированности логических приемов мышления мы использовали качественные критерии (сформированность предметной и собственно логической частей приема, осознание его структуры, самостоятельность применения) в сочетании с несколькими независимыми параметрами: *форма, обобщенность, развёрнутость и освоенность*.

Форму логического приёма мы связываем с этапами его формирования, выявленными П.Я. Гальпериным в его теории планомерно-поэтапного формирования умственных действий. Форма приема может быть материализованной, внешнеречевой (устной или письменной), умственной. Её можно идентифицировать, наблюдая за работой обучающихся.

Обобщённость приёма предполагает способность безошибочно применять его на любом предметном материале при решении задач любых типов.

Показателем *освоенности* служит самостоятельность и скорость выполнения задания.

Степень развёрнутости приёма определяется числом явно представленных операций, безошибочно выполняемых обучающимся. Развернутость рассматривается как вспомогательная характеристика.

Уровни сформированности логических приёмов мышления характеризуются следующими диагностируемыми у учащихся признаками [1].

Нулевой уровень – учащийся владеет предметным содержанием (может воспроизвести определения используемых понятий), но при этом не может применить логический приём.

Локально-предметный (низкий) уровень – учащийся владеет предметным содержанием, но отсутствует перенос приёма с одного предметного материала на другой. При выполнении задания требуется помощь преподавателя, приём применяется в материализованной форме, степень обобщенности, освоенность и развёрнутость приёма низкие.

Локально-операциональный (средний) уровень – учащийся самостоятельно и правильно выполняет большинство предложенных заданий. При использовании приёма в задаче учащийся не может обосновать своё решение, для исправления своих ошибок ему нужна небольшая помощь преподавателя. Приём при этом применяется во внешнеречевой форме со средними обобщенностью и развёрнутостью.

Осознанно-операциональный (высокий) уровень – учащийся самостоятельно и правильно выполняет все предложенные задания, может пояснить свои действия, назвать используемые логические приёмы, осознаёт их структуру. Приём используется во внешнеречевой или умственной форме с высокой степенью обобщённости, освоенности и развёрнутости.

В связи с изменениями в системе общего среднего и высшего образования за последние годы (уменьшение количества академических часов по физике в базисных учебных планах средней школы, введение ЕГЭ по физике в Омской области с 2008 г., введение в действие ФГОС следующих поколений на ступенях общего среднего и высшего профессионального образования и т.д.) представляет интерес сравнение уровня сформированности логических приемов мышления и рефлексии у студентов первого курса физического факультета классического университета до 2005 г., с 2007 по 2013 гг. и с 2013 по 2018 гг. Мы проверяли сформированность у студентов первого курса элементарного анализа, реляционно-логического анализа, обобщения, синтеза, классификации и рефлексии. В таблице 1 приведены наши данные: усредненные показатели с 2001 по 2005 г., т.к. в течение этого периода распределение студентов по уровням сформированности приемов мышления существенно не менялось (первая строка в каждой клетке таблицы, [1]); с 2007 по 2013 г. (вторая строка в каждой клетке таблицы [1]); с 2013 по 2018 г. (третья строка в клетках таблицы).

Таблица 1

Сформированность логических приемов и рефлексии у студентов 2001 - 2018 гг., %

Уровни сформированности	Элем. анализ	Рел.-лог. анализ	Обобщение	Классификация	Синтез	Рефлексия
Нулевой	14	29	45	43	34	45
	20	25	42	31	40	67
	33	27	34	31	48	56
Низкий	6	31	20	28	12	29
	12	46	33	22	35	18
	3	44	32	20	27	24
Средний	5	19	14	24	11	16
	17	27	18	38	22	13
	6	27	29	41	22	15
Высокий	75	21	21	5	43	10
	51	2	7	9	3	2
	58	2	5	8	3	5

Непараметрический статистический анализ (применение критерия χ^2 там, где это возможно) показывает резкое снижение уровня сформированности логических приемов мышления и рефлексии у студентов-первокурсников за период с 2005 по 2013 г. В 2013-2018

гг. выявлено дальнейшее снижение уровня сформированности элементарного анализа на уровне значимости 0,05. Значимых изменений уровня сформированности остальных логических приемов за последние 5 лет по сравнению с 2007-2013 гг. не обнаружено. Он остается недопустимо низким.

Недостаточная сформированность мыслительного инструментария у студентов-первокурсников сопровождается отсутствием у них необходимых умений выполнять универсальные учебные действия, которые должны были сформироваться в средней школе. Поэтому при обучении студентов физике возникают серьезные проблемы, требующие радикальных коррекционных мер. Наши модели обучения физике студентов физического факультета классического университета и технических вузов описаны в других наших публикациях (например, [1, 2]).

Для оценки сформированности когнитивных ключевых компетенций в целом необходимо диагностировать также уровень сформированности у студентов эвристических приемов и методологических компетенций в деятельностной развертке. О сформированности этих наблюдаемых элементов делается вывод методом экспертных оценок на основании наблюдения учебной деятельности студентов посредством интеграции частных результатов диагностики. Наши исследования показали, что логический, эвристический и методологический компоненты обеспечивают освоение студентом когнитивных ключевых компетенций в целом.

Библиографический список

1. Ланкина М. П., Эйсмонт Н. Г., Дубенский Ю. П. Активизация умственной деятельности учащихся: моделирование обучения физике: моногр. Омск: Изд-во Ом. гос. ун-та, 2013. 148 с.
2. Ланкина М. П., Эйсмонт Н. Г. Компетентностный подход: особенности реализации в физическом и техническом образовании: моногр. Омск: Изд-во Ом. гос. ун-та, 2015. 148 с.

УДК 519

В.Е. Ложников

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ГЕЙЗЕНБЕРГА ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ ВАНГА-ЛАНДАУ

Аннотация. Алгоритм Ванга-Ландау является одним из новых методов компьютерного моделирования, который применим во многих областях: исследование полимерных цепочек, моделирование процесса сворачивания белков, численное интегрирование, а также с целью получения критических свойств спиновых систем и моделирования тонких магнитных пленок. Данный метод был применен для моделирования критических свойств трехмерной изотропной модели Гейзенберга. Получены такие термодинамические величины как внутренняя энергия, намагниченность. Сделан вывод о применимости данного алгоритма к исследованию трехмерной изотропной модели Гейзенберга.

Ключевые слова: фазовые переходы, метод Ванга-Ландау, энтропическое моделирование, методы Монте-Карло.

В моделировании фазовых переходов и критических свойств спиновых систем классическими алгоритмами существуют ограничения, обусловленные эффектами, возникающими вблизи критической точки. Аномально большие флуктуации параметра порядка приводят к проявлению эффекта, который был назван «эффектом критического замедления», по причине того что время, требуемое для получения термодинамических величин спиновой системы, существенно возрастает. С целью уменьшения времени счета были разработаны кластерные алгоритмы, такие как однокластерный алгоритм Вольфа и многокластерный алгоритм Свендсена-Ванга. Динамический критический индекс - параметр, который определяет эффективность алгоритма в преодолении данного эффекта, - для кластерных алгоритмов существенно ниже, чем для классического Метрополиса, но существуют принципиально другие методы, которые позволяют получить термодинамические характеристики системы при полном отсутствии критического замедления вблизи точки фазового перехода. К таким методам относится алгоритм Ванга-Ландау [1], который позволяет, единожды вычислив плотность энергетических состояний, рассчитать такие термодинамические величины как энергия, теплоемкость, свободная энергия и энтропия за счет представления статистической суммы в виде разложения по плотности энергетических состояний:

$$Z = \sum_E g(E) \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) \quad (1)$$

Помимо указанных выше плюсов алгоритма, существуют определенные ограничения, которые существенно уменьшают размеры систем, исследуемых с его использованием. Так как данный метод является гистограммным и реализуется случайный немарковский процесс блуждания в пространстве энергии, то на сходимости алгоритма существенным образом сказывается размер исследуемого энергетического интервала, который напрямую зависит от размера исследуемой системы. При достаточно больших размерах решетки наблюдается расходимость, и нет возможности реализовать параллелизм по данным (что тоже является ограничением и отличительной особенностью от вышеуказанных классических алгоритмов). Это приводит к тому, что при помощи данного алгоритма сложно или невозможно исследовать большие многомерные системы, потому как с определенного порога величины спиновой системы начинает наблюдаться расходимость, и предсказать, когда алгоритм сойдется, не представляется возможным. По вышеуказанным причинам был разработан [4] параллельный алгоритм, который был применен к двух- и трехмерной модели Изинга для расчета таких величин как энергия, теплоемкость, свободная энергия и внутренняя энергия.

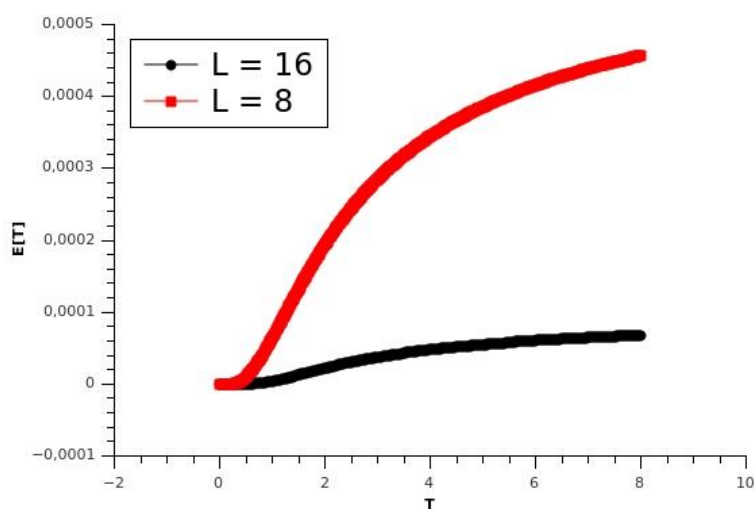


Рис. 1. Внутренняя энергия, полученная для трехмерной изотропной модели Гейзенберга методом Ванга-Ландау для решеток размером $L = 16$ и $L = 8$ (приведенный размер решеток выбран для наглядности)

В основе параллельного метода лежит идея разбиения общего энергетического интервала на подчасти, каждая из которых обрабатывается отдельной репликой алгоритма, и реализация обмена плотностью энергетических состояний между соседними репликами для соблюдения принципа детального баланса [2]. Но для реализации параллельного метода требуется получить понимание принципиальной возможности получения корректных результатов для последовательной версии алгоритма применительно к трехмерной модели Гейзенберга.

Существуют работы, в которых рассматривается получение намагниченности и восприимчивости спиновой системы при помощи данного алгоритма [3].

Намагниченность возможно получить из следующего соотношения:

$$\langle M(T, 0) \rangle = \frac{1}{Z} \sum_E \bar{M}(E) g(E) \exp \left\{ \frac{-E}{kT} \right\} \quad (2)$$

где $\bar{M}(E)$ – статистическое среднее от $M\{Si\}$ с энергией E

$$\bar{M}(E) = \frac{\sum_{Si} |M_{Si}| \delta(E - E\{Si\})}{\sum_{Si} \delta(E - E\{Si\})} \quad (3)$$

Восприимчивость вычисляется по следующей формуле [3]:

$$\chi(T, H) = \frac{dM}{dH} = \frac{1}{kT} [\langle M^2(T) \rangle - \langle M(T) \rangle^2] \quad (4)$$

В данной работе получена намагниченность трехмерной модели Гейзенберга. Поведение намагниченности, полученное с использованием данного алгоритма, согласуется с классическими алгоритмами, что позволяет использовать его для расчета восприимчивости и реализации параллельной версии с целью использования на суперкомпьютерных системах.

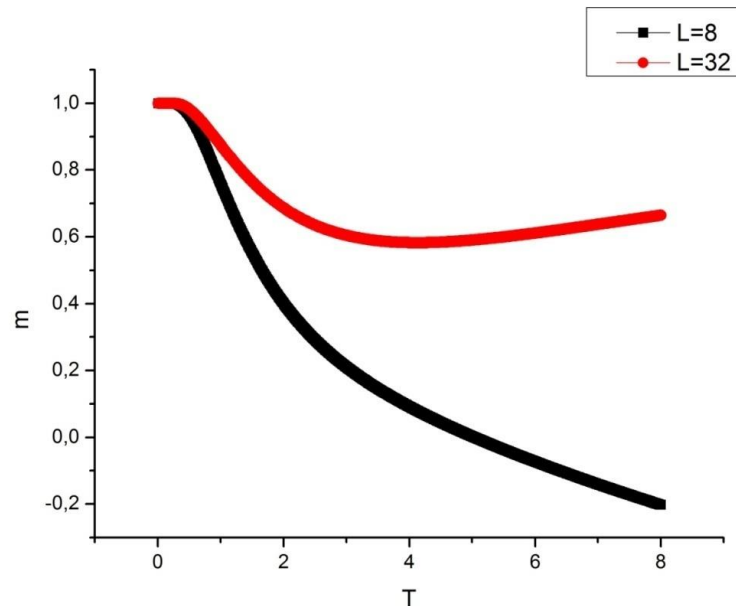


Рис. 2. Намагниченность, полученная для трехмерной изотропной модели Гейзенберга для решеток размером $L = 8$ и $L = 32$

Модель Гейзенберга имеет высокую вычислительную сложность на больших решетках, особенно с введением диполь-дипольного взаимодействия. По данной причине приобретает актуальность параллельная версия данного алгоритма, реализация которой

позволит сократить время счета и получить ещё один метод, с помощью которого возможно исследование магнитных фазовых переходов и свойств тонких магнитных пленок.

Библиографический список

1. Wang F., Landau D. P., Efficient, Multiple-Range Random Walk Algorithm to Calculate the Density of States // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86, P. 2050.
2. Vogel T., Li Y. W., Wust T., Landau D. P. Generic, Hierarchical Framework for Massively Parallel Wang-Landau Sampling // Phys. Rev. Letters. 2013. P. 5.
3. Brown G., Schulthess T. C. Wang-Landau estimation of magnetic properties for the Heisenberg model // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. 10E303.
4. Ложников В. Е., Прудников П. В. Моделирование фазовых переходов в спиновых системах методом Ванга-Ландау // Актуальные проблемы современной науки. 2017. С. 126–129. URL: https://omgtu.ru/general_information/faculties/radio_engineering_department/departament_of_quot_physics_quot/File/2/APSN_2017.pdf

УДК 539.172.17

С.И. Мазур, В.Л. Литневский¹, Р.С. Курманов¹, Г.И. Косенко², Ф.А. Иванюк³

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

¹Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

²Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия

³Институт ядерных исследований, г. Киев, Украина

ВЫБОР ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ РАСЧЕТА СЕЧЕНИЯ КАСАННЯ В РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Аннотация. Расчет сечения слияния, деления и сечение остатков испарения - сложная теоретическая задача. Важное значение при этом играет выбор потенциала взаимодействия между двумя ядрами. Авторы предлагают новый вариант выбора потенциала с хорошо определенной глубиной и диффузностью потенциала. Показано, в этом случае высота барьера слияния станет меньше, а диффузия потенциала больше. Это позволяет лучше описать сечения реакций слияния-деления при малых энергиях.

Ключевые слова: тяжелые ионы, потенциал взаимодействия.

Исследование реакций с тяжелыми ионами уже привело к синтезу большого числа новых элементов. Удалось завершить седьмой период периодической системы Д.И. Менделеева [1]. В настоящее время ведутся работы, направленные на синтез элементов тяжелее Оганессона – 118-го элемента. Развивается не только экспериментальная техника и установки, но и теоретические подходы. Авторы тоже пытаются внести свой вклад в изучение данной темы [2,3]. На протяжении нескольких лет авторы развивали двухшаговую модель реакций слияния-деления [4,5]. В настоящей работе мы представим некоторые изменения, которые мы хотим внести в нашу модель.

Двухшаговая модель делит процесс слияния-деления тяжелых ионов на две стадии: достижение касания ионами, и дальнейшая эволюция образовавшейся единой системы. Изменения предполагается внести в первую часть. Энергия взаимодействия тяжелых ионов складывается из ядерной и кулоновской частей. Ядерная часть определялась как [6]

$$U_{12}(r) = \int \frac{V_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_1}{a_v}\right)} \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_2}{a_d}\right)} dV_2, \quad (1)$$

$$U(r) = \frac{1}{2}(U_{12}(r) + U_{21}(r)).$$

Здесь $R_1 = 1.25 A^{1/3}$, а $R_2 = 1.12 A^{1/3} - 0.86 A^{-1/3}$. A – массовое число первого или второго ядра соответственно. Параметры $V_0 = 50 \text{ MeV}$, $\rho_0 = 0.17 \text{ A/ fm}^3$, $a_d = 0.54 \text{ fm}$, $a_v = 0.65 \text{ fm}$. Затем в работе [7] было предложено использовать три разных варианта значений V_0 и a_v . Причем автор [7] использовал разные значения для глубины и диффузности потенциала при расчетах разных реакций с кислородом. Поэтому выбор глубины потенциала во многом искусство. Мы хотим внести однозначность в выбор глубины потенциала и его диффузности. Например, при расчете одночастичных уровней ядер [8] используется потенциал Вудс-Саксоновского типа, где глубина потенциала и его диффузность зависят от A и Z ядра. Мы решили проверить, насколько хорошо данный потенциал подойдет к решению нашей задачи. В модели поверхностного трения [6,7] предполагается, что диссипация энергии поступательного движения во внутреннюю происходит при касании ядер, когда нуклоны одного ядра попадают в поле другого ядра. В работе [8] находится отдельно глубина потенциала для протонов и нейтронов. Мы будем брать среднее значение для этой величины, которую будем определять следующим образом:

$$V = \frac{AV_p V_n}{ZV_n + NV_p}, \quad A = Z + N. \quad (2)$$

Аналогично мы поступаем и с параметром диффузности. Результат показан на рисунке 1.

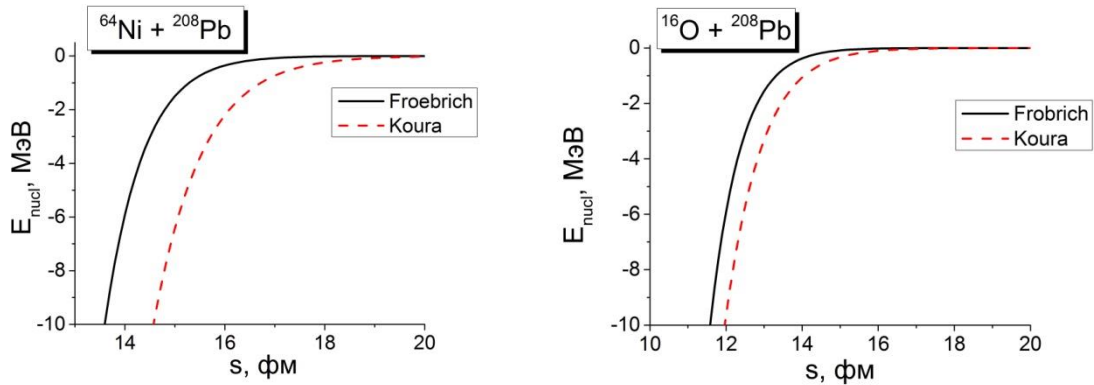


Рис. 1. Сравнение старого (сплошная линия) и нового (штриховая линия) варианта потенциала

Потенциал получается глубже и имеет большую диффузность. Это приводит к тому, что барьер к слиянию становится меньше. Это хорошо видно на рисунке 2.

$$\begin{aligned} \dot{r} &= p_r / \mu \\ \dot{p}_r &= -\frac{dV}{dr} - K_r p_r / \mu + \xi \end{aligned} \quad (3)$$

r – расстояние между центрами масс сталкивающихся ядер, p – соответствующий импульс, K_r – коэффициент трения, который определяется производной ядерной части потенциала V . ξ – случайная сила. Для простоты мы будем рассматривать сферические ядра и пренебрегать возможными деформациями ядер при сближении.

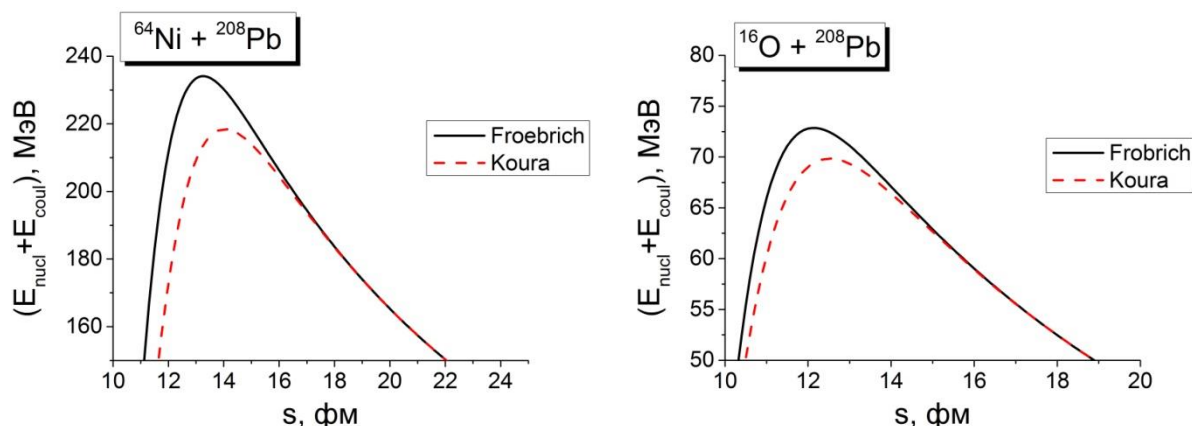


Рис. 2. Сравнение потенциальной энергии для старого и нового варианта потенциала. Обозначения как на рисунке 1

Для начала мы сравниваем вероятность касания в случае лобового столкновения (рис. 3). Как и следует ожидать из рисунка 2, вероятность касания ядер для нового потенциала при малых энергиях больше. Если определять барьер к слиянию как энергию, при которой вероятность касания равна 0.5, то для тяжелой комбинации получается практически одинаковый результат. Для легкого снаряда барьер к слиянию отличается примерно на 10 МэВ.

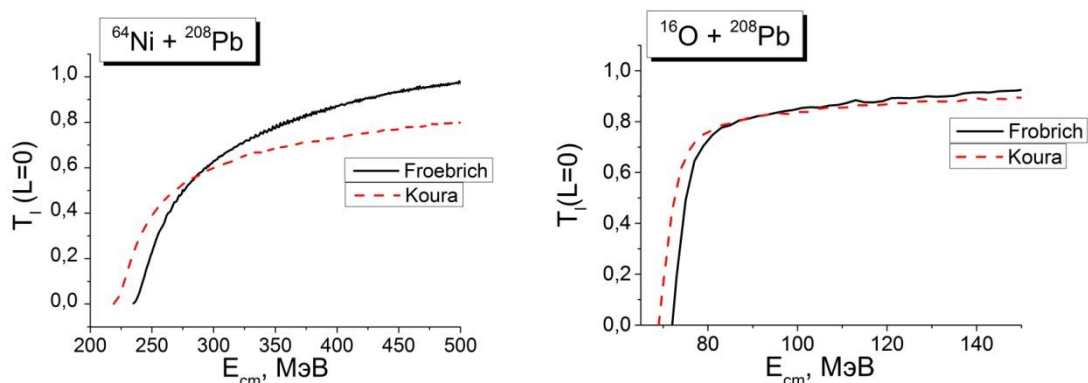


Рис. 3. Сравнение вероятности касания, в зависимости от энергии налетающего ядра

Рисунок 4 дает представление о соотношении сечений касания, получаемых для старого и нового потенциала. При малых энергиях новый потенциал дает большие значения сечения касания. При больших энергиях – большие сечения дает старый потенциал. Сравнение с экспериментальными данными показывает, новый потенциал при всех энергиях приводит к сечениям касания большим, чем экспериментальное сечение слияния. Заметим, что старый потенциал не давал таких результатов. Надо отметить, что сечение касания включает в себя кроме сечения слияния еще и сечение реакций глубоко неупругих столкновений.

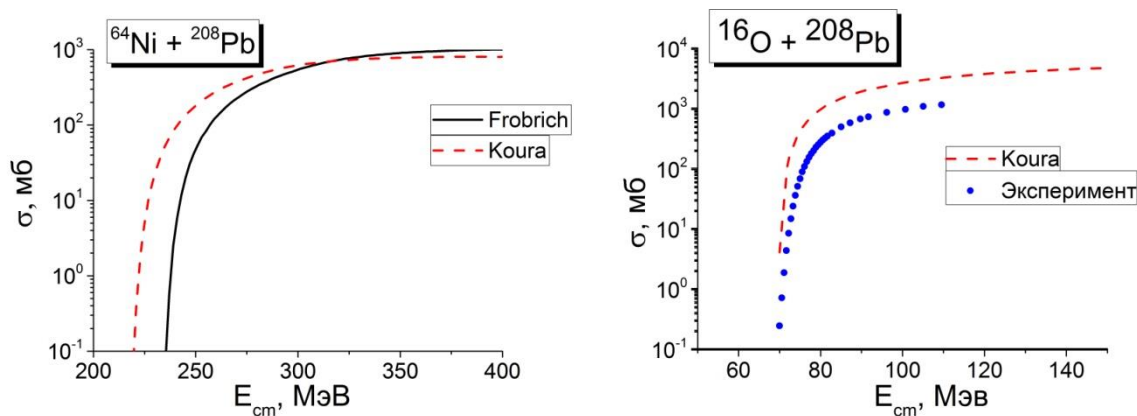


Рис. 4. Сравнение сечения касания, рассчитанное с использованием старого и нового потенциала (слева) и сравнение сечения касания и экспериментального сечения слияния [9]

Таким образом, мы отмечаем, что новый вариант потенциала позволяет продвинуться в область низких энергий. Кроме этого, хорошо определенная глубина ядерного потенциала делает его более удобным для практического использования. Разумеется, первая положительная оценка применения нового потенциала не делает его безоговорочно лучшим, но дает надежду на его успешное применение в более реалистичных расчетах.

Библиографический список

1. Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Lobanov Yu. V. [et al.]. Synthesis of the isotopes of elements 118 and 116 in the ^{249}Cf and $^{245}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ fusion reactions. // Phys. Rev. 2006. Vol. C. 74. 044602.
2. Литневский В. Л., Косенко Г. И., Иванюк Ф. А. [и др.]. Зависимость сечений касания сталкивающихся ядер от выбора критерия касания (на примере реакции слияния ядер ^{36}S , ^{48}Ca , ^{48}Ti , ^{64}Ni с ядром ^{238}U) // Актуальные проблемы современной науки: материалы VI Регион. научно-практич. конф. с межд. участием (Омск, 28 апр. 2017 г.) / ОмГТУ. Омск, 2017. С. 122-125. URL: https://omgtu.ru/general_information/faculties/radio_engineering_department/department_of_quot_physics_quot/File/2/APSN_2017.pdf
3. Мазур С. И., Курманов Р. С., Литневский В. Л. [и др.]. Влияние ориентации сталкивающихся ядер на вероятность касания // Актуальные проблемы современной науки: материалы VI Регион. научно-практич. конф. с межд. участием (Омск, 28 апр. 2017 г.) / ОмГТУ. Омск, 2017. С. 129-133. URL: https://omgtu.ru/general_information/faculties/radio_engineering_department/department_of_quot_physics_quot/File/2/APSN_2017.pdf
4. Kosenko G. I., Shen C. and Abe Y. A Dynamical Approach to Heavy-ion Fusion: $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ // JNRS (Japan). 2002. Vol. 3, № 1. P. 19-22.
5. Косенко Г. И., Иванюк Ф. А., Пашкевич В. В. [и др.]. Применение двухшаговой динамической модели для расчетов характеристик реакций слияния-деления // Ядерная физика. 2008. Т. 71, № 12. С. 2086-2100.
6. Gross D. H. E. and Kalinowski H. Friction model of heavy-ion collisions // Phys. Rep. 1978. Vol. 45, № 3. P. 175-210.
7. Froebrich P. Fusion and capture of heavy ions above the barrier: analysis of experimental data with the surface friction model. // Phys. Rep. 1984. Vol. 116, № 6. P. 337-400.
8. Koura H. and Yamada M. Single-particle potentials for spherical nuclei // Nucl. Phys. 2000. Vol. A 671. P. 96-118.
9. Morton C. R., Berriman A. C., Dasgupta M. [et al.]. Coupled-channels analysis of the $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ fusion barrier distribution // Phys. Rev. 1999. Vol. C 60. 044608.

Д.И. Плотников, И.В. Комаров, Д.А. Поляков, К.И. Никитин
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

РЕГИСТРАЦИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ

Аннотация. В статье рассматривается регистрация электрических сигналов частичных разрядов с использованием мостовой схемы, отличающейся от общепринятой учетом паразитных индуктивностей, имеющих в схеме как следствие наличия соединительных проводов. На основе расчета мостовой схемы регистрации проведена балансировка плеч мостовой схемы, позволившая снизить уровень внешних электрических сигналов до уровня помех. В то же время, возникающий в схеме частичный разряд вызывает появление электрического сигнала, в 10 раз превышающего уровень внешних возмущений, вызванных источником напряжения. Экспериментальные исследования регистрации частичных разрядов показали преимущественную сходимость результатов расчета и эксперимента.

Ключевые слова: частичный разряд, изоляция кабелей, паразитная индуктивность, балансировка мостовой схемы.

В процессе эксплуатации высоковольтного электрооборудования в его изоляции могут образовываться микродефекты, в которых под воздействием высокой напряженности электрического поля будут возникать частичные разряды (ЧР). Их регулярное появление ведет к постепенному увеличению размеров дефекта и образованию дендритов [1,2]. Следовательно, регистрация частичных разрядов может быть использована как диагностический инструмент, позволяющий определять наличие и местоположение дефектов изоляции [3,4].

Возникновение ЧР сопровождается такими явлениями как [5]:

- повышенный нагрев участков, где происходит образование ЧР;
- электромагнитное излучение;
- разрушение диэлектрика;
- протекание импульсных токов и т.д.

На основании этих явлений разработаны методы регистрации ЧР, которые можно разделить по принципу работы на:

- электромагнитный;
- акустический;
- электрический.

Последний является наиболее информативным и весьма несложным способом регистрации за счет широкого спектра датчиков, с помощью которых и происходит оценка сигналов. Однако существенным минусом метода является низкая помехоустойчивость.

Среди известных схем регистрации электрических сигналов частичных разрядов наилучшими характеристиками обладает мостовая схема регистрации, так как позволяет при балансировке моста добиться фильтрации внешних сигналов и регистрировать только ЧР, возникающие в испытуемом объекте [6]. Тем не менее, у мостовой схемы, как и у других, существенным недостатком является неучет паразитных индуктивностей, имеющих в схеме регистрации из-за использования соединительных проводов, что может существенно повлиять на точность регистрации. Следовательно, учет паразитных индуктивностей при балансировке моста является обязательным условием для получения достаточно точного расчета и достоверных результатов регистрации электрических сигналов частичных разрядов. Балансировка мостовой схемы регистрации (рис. 1) заключается в таком подборе

параметров, при котором напряжение на измерительном приборе будет равно нулю или настолько мало, что им можно будет пренебречь.

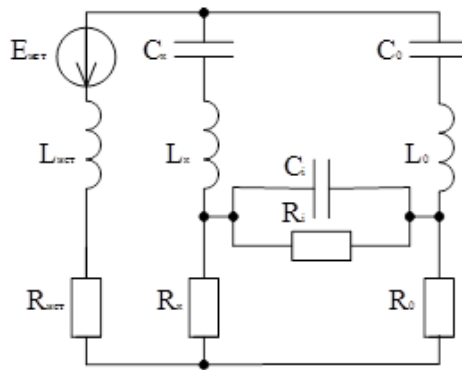


Рис. 1. Мостовая схема регистрации ЧР с учетом паразитных индуктивностей

Расчет переходного процесса, моделирующего возникновение ЧР, производился операторным методом. Операторная схема замещения для мостовой схемы регистрации ЧР с учетом паразитных индуктивностей представлена на рис. 2.

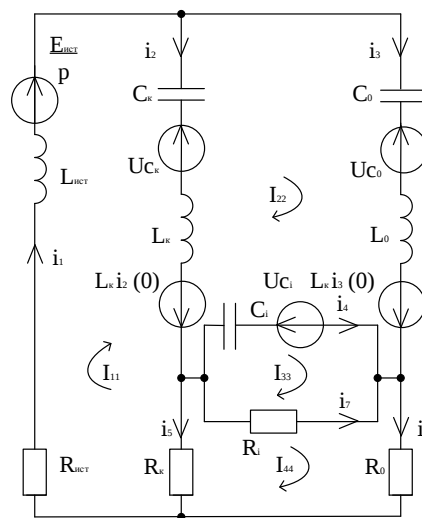


Рис. 2. Операторная схема замещения мостовой схемы регистрации ЧР

Система уравнений, составленная по методу контурных токов, для данной схемы имеет вид:

$$\begin{cases} I_{11}(R_{\text{доп}} + L_{\text{доп}}p + \frac{1}{C_k p} + R_k + L_k p) - I_{22}(\frac{1}{C_k p} + L_k p) - I_{44}R_k = \frac{E}{p} \\ I_{22}(\frac{1}{C_k p} + \frac{1}{C_0 p} + R_i + L_k p + L_0 p) - I_{11}(\frac{1}{C_k p} + L_k p) - I_{33}R_i = 0 \\ I_{33}(R_i + \frac{1}{C_i p}) - I_{22}R_i - I_{44}\frac{1}{C_i p} = 0 \\ I_{44}(R_k + \frac{1}{C_i p} + R_0) - I_{11}R_k - I_{11}\frac{1}{C_i p} = 0 \end{cases}$$

После решения системы уравнений было выведено решение для напряжения на емкости измерительного элемента. До балансировки моста (рис. 3, а) амплитуда колебаний достаточно велика и может быть соизмерима с сигналами частичных разрядов, возникающих

в схеме. После балансировки моста (рис. 3, б) значение напряжения составляет менее 1 мВ, что сопоставимо с уровнем помех в электроэнергетических системах.

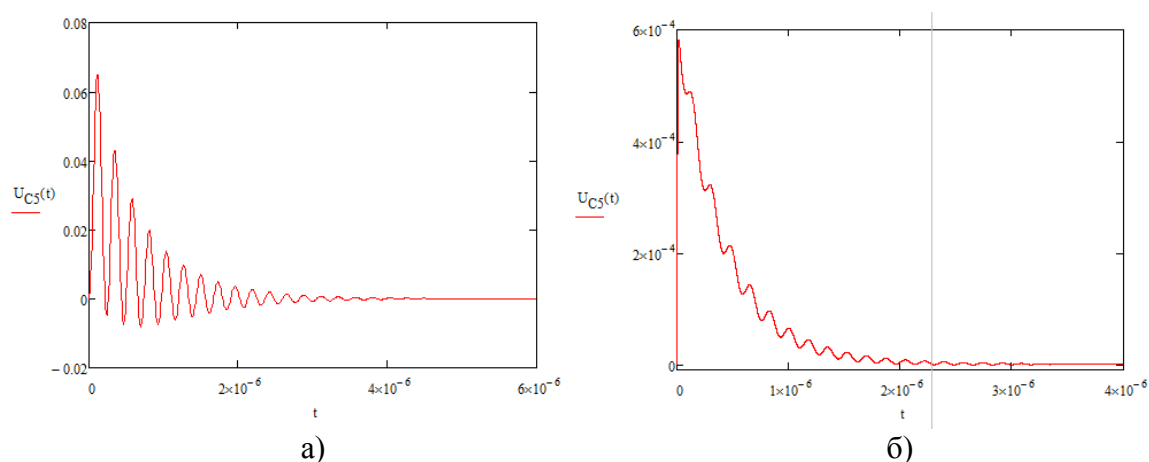


Рис. 3. Уровень помех: а) до настройки; б) после настройки

Кроме того, требуется произвести расчет возникающего в схеме частичного разряда, необходимый для обработки данных экспериментальных исследований. Операторная схема замещения для определения электрических сигналов, вызванных частичным разрядом, представлена на рис. 4.

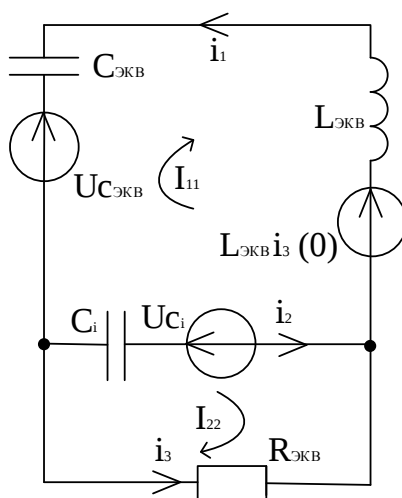


Рис. 4. Операторная схема замещения для расчета сигналов ЧР

Система уравнений по методу контурных токов для данной схемы замещения имеет вид:

$$\begin{cases} I_{11}(L_{\text{ЭКВ}}p + \frac{1}{C_{\text{ЭКВ}}p} + \frac{1}{C_i p}) - I_{22}(\frac{1}{C_i p}) = -\frac{q}{C_{\text{ЭКВ}}p} \\ I_{22}(\frac{1}{C_{\text{ЭКВ}}p} + R_{\text{ЭКВ}}) - I_{11}(\frac{1}{C_i p}) = 0 \end{cases}$$

Электрический сигнал напряжения на емкости измерительного прибора, вызванный частичным разрядом величиной в 10 пКл, представлен на рис. 5. Полученный расчетный сигнал показывает, что амплитуда колебаний при частичном разряде примерно в 10 раз

больше, чем от внешних помех сбалансированного моста, хотя ЧР с кажущимся зарядом 10 пКл считается неопасным и не вызывает существенных разрушений изоляции.

Электрический сигнал от частичного разряда 29 пКл, полученный в результате эксперимента с использованием сбалансированной мостовой схемы регистрации, представлен на рис. 6. Длительность представленного импульса составляет около 2 мкс.

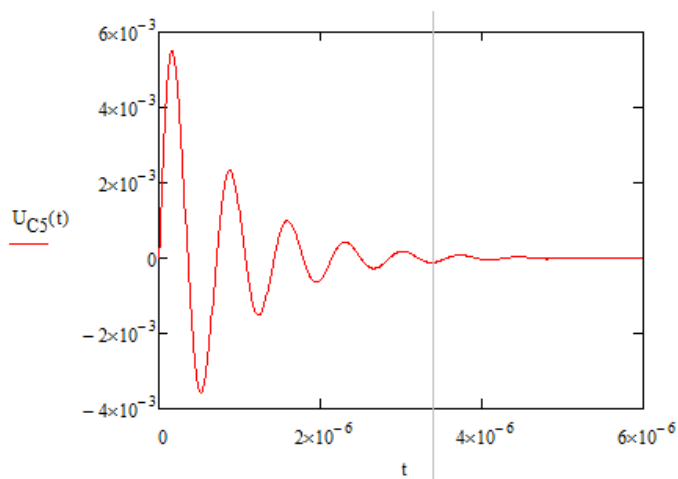


Рис. 5. Электрический сигнал ЧР, полученный теоретически

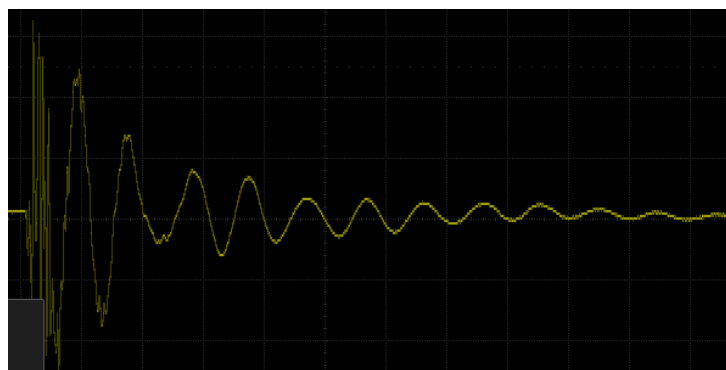


Рис. 6. Электрический сигнал ЧР, полученный экспериментально

Сигнал частичного разряда, зарегистрированный экспериментально, преимущественно соответствует расчетному сигналу напряжения на измерительном приборе. Однако наблюдается некоторое расхождение частоты колебаний, предположительно, вызванное недостаточно точным определением индуктивностей соединительных элементов схемы.

Библиографический список

1. Chen X. [и др.]. Electrical treeing behavior at high temperature in XLPE cable insulation samples // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2015. Т. 22, № 5. С. 2841–2851.
2. Резинкина М. М., Резинкин О. Л., Носенко М. И. Зависимость фазы появления частичных разрядов в полиэтиленовой изоляции от стадии роста дендрита // Журнал технической физики. 2001. Т. 71, № 3. С. 69–71.
3. Исмаилов Ф. Р., Максудов Д. В. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т. 3, № 43. С. 98–100.

4. He X., Xie G., Jiang Y. Online partial discharge detection and location system using Wireless Sensor Network // Energy Procedia. 2011. Т. 12. С. 420–428.

5. Вдовико В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 155 с.

6. Сиялов Н. В., Фоменко Н. А., Словесный С. А. Совершенствование метода регистрации частичных разрядов // Электроэнергетика глазами молодежи: Труды VI международной молодежной научно-технической конференции. 2015. Т. 1. С. 576–581.

УДК 372.853

Л.В. Рабчук, С.В. Тучков

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

О ПРОБЛЕМАХ ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ФИЗИКА»

Аннотация. Показано, как решается задача организации самостоятельной работы студентов на кафедре физики УГАТУ. Рассмотрены проблемы, связанные с реализацией данной задачи.

Ключевые слова: ФГОС 3+, контролируемая самостоятельная работа студента, входной контроль, балльно-рейтинговая система.

В соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС 3+) в 2015-2016 годах на кафедре физики Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ) были переработаны рабочие программы по всем специальностям дисциплины «Физика». В переработанных рабочих программах значительно увеличено количество часов, выделяемых на самостоятельную работу студентов, и для студентов очного отделения в течение семестра составляет от 29 до 71 часа.

Самостоятельная работа формирует навыки, умения и знания, приемы познавательной деятельности и обеспечивает интерес к творческой работе студентов [1]. Эта работа предусматривает проработку и повторение лекционного материала и материала учебников и учебных пособий, подготовку к лабораторным и практическим занятиям, рубежному контролю и т.д. Аудиторная и внеаудиторная самостоятельная работа играет важную роль при формировании компетенций, которые должны демонстрировать студенты после завершения обучения в вузе [2]. Такими компетенциями являются способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений и методов естественных наук и математики, готовность к решению сложных инженерных задач с использованием базы знаний математических и естественнонаучных дисциплин, способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности и др.

Основными элементами самостоятельной работы студента по дисциплине «Физика» являются:

- самостоятельная работа во время аудиторных занятий при непосредственном участии преподавателя,
- подготовка к аудиторным формам занятий (лекциям, практическим и лабораторным занятиям),

- выполнение контролируемой преподавателем самостоятельной работы (решение тестовых заданий и задач),
- внеаудиторная самостоятельная работа студента по подготовке к рубежному и итоговому контролю знаний без непосредственного участия преподавателя, но при его координирующей функции.

В настоящей публикации показано, как осуществляется организация и самостоятельной работой студентов на кафедре физики УГАТУ, а также рассмотрены проблемы, связанные с реализацией указанной задачи.

При чтении лекционного курса дисциплины «Физика» на каждый из трех разделов выделяется по 24-28 аудиторных часов. В ходе лекций преподаватель излагает и разъясняет основные понятия разделов, дает рекомендации и указания на самостоятельную работу. В процессе лекционного занятия студент должен выделять наиболее важные моменты, анализировать основные положения, а после прослушивания лекции проработать и осмыслить полученный материал. Непосредственно в аудитории студентам предоставляется большой объем информации, частично базирующийся на школьной программе и перекрывающийся с ней, поэтому преподаватель может контролировать усвоение материала на занятии с помощью экспресс-опросов по конкретным темам или проводя мини-тестовый контроль знаний (1-3 вопроса). Более детально оценить уровень освоения студентом лекционного материала можно при защите лабораторных работ, на практических занятиях, при выполнении контролируемой самостоятельной работы, на индивидуальной консультации, при проведении текущего, промежуточного или итогового контроля знаний.

В рабочей программе дисциплины «Физика» предусмотрены следующие виды самостоятельной работы в учебном процессе:

- подготовка к практическим занятиям,
- выполнение индивидуального домашнего задания (КСР),
- подготовка отчетов к лабораторным работам,
- подготовка к защите лабораторных работ.

На практические занятия в семестре выделяется 14–18 аудиторных часов. По каждому разделу дисциплины в течение семестра на пяти практических занятиях в течение 30 минут студентам предлагается пройти бланковое тестирование. Тесты включают по десять заданий. Как показывает практика, лишь 20–30% студентов укладываются в рекомендуемые нормативы времени, поэтому преподаватели увеличивают время, выделяемое на тестирование, до 40–45 минут. Несмотря на то что тестирование по определенным темам проводится только после разбора данной темы на лекционном и практическом занятии и при проведении тестирования разрешено пользоваться конспектами лекций и дополнительной литературой, только 50–70 % студентов справляются с заданиями на 60 и более процентов.

В течение каждого семестра студенты выполняют контролируемую самостоятельную работу (КСР) по разработанному преподавателями кафедры сборнику «Контрольно-измерительные материалы по дисциплине «Физика»». Количество тестовых заданий и задач, выполняемых каждым студентом в течение семестра, составляет порядка 40–60. На проверку письменных индивидуальных заданий КРС на учебную группу, согласно рабочей программе, выделяется 3–4 аудиторных часа. При средней численности группы 20 человек (комплектация некоторых групп более 30 человек) преподавателю на проверку каждого задания отводится 10–20 секунд. Для качественной и объективной оценки самостоятельной работы студентов этого времени совершенно не достаточно, поэтому преподаватели вынуждены назначать дополнительные консультации по приему КРС.

Для закрепления теоретических знаний и приобретения навыков проведения экспериментального исследования студент в течение семестра выполняет по 5–6 лабораторных работ, на выполнение и защиту которых отводится 20–24 аудиторных часа. По каждой из выполненных работ студент в соответствии с требованиями, указанными в

методических указаниях к лабораторным работам, оформляет отчет. Согласно рабочей программе, предусмотрена защита каждой из выполненных лабораторных работ. Защита проводится в виде устной беседы, преимущественно по контрольным вопросам, приведенным в методических указаниях. При проведении защиты работ преподаватели кафедры могут использовать компьютерное тестирование с использованием, в частности, программы «Конструктор тестов». Как показывает практика, только 10–20 % студентов могут защитить лабораторную работу с первой попытки. Многие студенты не могут качественно подготовиться к защите лабораторных работ, у них возникают трудности в формулировке основных (базовых) понятий и определений, физических законов, записи формул и пояснениях к ним. Времени, отводимого студентам на лабораторные занятия, при их систематической работе вполне достаточно как для выполнения, так и для защиты лабораторных работ. Несмотря на это, 50–80 % студентов не могут работать ритмично и либо приходят на занятия без заготовок отчетов, не подготовившись к защите лабораторных работ, либо, даже прочитав рекомендуемую методическую литературу, не могут дать грамотные ответы на контрольные вопросы. Как показывает практика, 30–50 % студентов при условии использования методического материала могут успешно пройти компьютерное тестирование, но при устной беседе и эти студенты демонстрируют пробелы в базовых знаниях.

Низкую активность студентов на лабораторных и практических занятиях, в частности, можно объяснить тем, что с началом каждого последующего семестра 10–20 % студентов имеют задолженности по различным дисциплинам предыдущего семестра и заняты решением вопросов, связанных с их ликвидацией. На момент окончания лабораторного практикума количество полностью отчитавшихся по лабораторным работам студентов в группе составляет, как правило, 20–40 % и преподаватель вынужден назначать дополнительное время по приему задолженностей по лабораторным работам. Даже несмотря на работу преподавателей в дополнительное время с целью сокращения количества должников по лабораторным работам в текущем семестре, к началу следующего семестра остаются студенты, не выполнившие лабораторные работы или не отчитавшиеся по ним.

Как показывает проводимый в течение последних лет входной контроль степени готовности студентов первого курса к обучению в университете, у большинства из них отсутствуют базовые знания по физике, а также мотивация к самостоятельному приобретению знаний и обучению. Студенты не обладают навыками самостоятельной работы, пытаются все вопросы и проблемы решать с использованием интернета, не работая с рекомендуемой учебно-методической литературой.

Переход на Единый Государственный Экзамен (ЕГЭ) и система подготовки учащихся в средней школе с приоритетом на его сдачу закономерно привели к тому, что в большинстве вузов по многим дисциплинам для промежуточной и итоговой аттестации студентов широко применяется именно тестовый контроль. С 2013 года экзамены по первому и второму разделу дисциплины «Физика» в УГАТУ заменены зачетами, экзамен студенты сдают только по третьему разделу. Зачет и экзамен проводится по билетам, утвержденным на кафедре. В каждый билет для зачета включены двенадцать тестовых заданий, в каждый экзаменационный билет включены шесть тестовых заданий, один теоретический вопрос и две задачи. Для облегчения самостоятельной подготовки к зачету студент может воспользоваться перечнем тестовых заданий для подготовки к зачету, а также списком вопросов, тестовых заданий и задач для подготовки к экзамену, на основании которых сформированы билеты. Перечень тестовых заданий имеется в открытом доступе на сайте вуза. Оценка выставляется в соответствии с требованиями балльно-рейтинговой системы. Задания полностью охватывают пройденный учебный материал, но при проверке работ преподаватели сталкиваются с тем, что 10–20 % студентов не могут привести решения, указывают только номер ответа. Это усложняет проведение качественной оценки знаний

студента, преподаватели вынуждены проводить устную беседу со студентами по проверке знаний. Наличие теоретического вопроса и задач в экзаменационных билетах частично снимает эту проблему и позволяет более объективно оценить знания и умения студента. Кроме того, при итоговом оценивании знаний по разделу «Оптика и квантовая механика» преподаватель работает со студентами второго курса, мотивация которых к обучению значительно выше, чем у студентов первого курса.

Главной функцией обучения студента на младших курсах является расширение и закрепление знаний, приобретаемых на традиционных формах занятий, превращение их в устойчивые умения и навыки. Цель применяемой на кафедре физики методики организации самостоятельной работы состоит в обеспечении современной естественнонаучной подготовки студентов и их профессионально-личностного развития. Задача преподавателя заключается в управлении, текущем учете и контроле выполнения самостоятельной работы, в побуждении студентов к активной самостоятельной работе, в оказании помощи при освоении дисциплины. Только в результате непосредственного диалога преподавателя со студентом могут быть определены перспективы внутреннего роста и творческий потенциал последнего.

Самостоятельная работа способствует развитию организованности и ответственности студента, творческого подхода к решению нестандартных задач. Опыт организации учебного процесса по дисциплине «Физика», в том числе самостоятельной работы, показывает, что, несмотря на низкий уровень школьной подготовки по физике, студент может строить свою индивидуальную образовательную траекторию и ритмично работать в течение учебного семестра. Повысить же качество самостоятельной работы можно только при ответственном отношении преподавателя к развитию навыков самостоятельной работы, активности студентов и их мотивации к профессионально-личностному развитию.

Библиографический список

1. Александров И. В., Строкина В. Р., Афанасьева А. М., Тучков С. В. Опыт организации проблемноориентированной внеаудиторной деятельности студентов// Инновации в образовании. 2013. № 4. С. 120–126.
2. Александров И. В., Строкина В. Р., Афанасьева А. М., Тучков С. В. Об опыте формирования компетенций при изучении дисциплины «Физика» // Современные проблемы многоуровневого образования. Материала VI международного симпозиума. Ростов на Дону, 2011. С. 29–33.

УДК 533.9.01

В.И. Струнин, Д.Б. Карабаева, Г.Ж. Худайбергенов

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛЕНКАХ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ (AlN)

Аннотация. Разработана методика измерений механических напряжений в тонких пленках на МИИ-4, которая позволяет получить распределение механических напряжений по поверхности пластины. С помощью данной методики измерены механические напряжения в тонких пленках нитрида алюминия на ситалловой подложке. Установлено, что описанные в работе пленки обладают как растягивающим, так и сжимающим напряжениями. Выведено

математическое выражение радиуса кривизны подложки для вычисления механических напряжений. Измерены механические напряжения в тонких пленках AlN в зависимости от мощности разряда.

Ключевые слова: тонкие пленки, нитрид алюминия, механические напряжения, радиус кривизны.

Введение. В последние годы проведено множество экспериментов по определению напряжений в тонких пленках, полученных различными путями. Независимо от способа их формирования, почти все пленки находятся в состоянии внутреннего напряжения. Напряжения могут быть сжимающими (т.е. пленка стремится расшириться параллельно поверхности). В другом случае она может изогнуться на подложке. Также напряжения могут быть растягивающими (т.е. пленка стремится сжаться). В определенных моментах силы оказываются достаточно большими, превышающими предел упругости пленки, и в этом случае пленка разрывается.

Если пленка отслаивается или отделяется от подложки в случае каких-либо внешних воздействий, то таким образом можно наблюдать её сморщивание. Данное поведение указывает на неравномерное распределение напряжений в пленке. Охлаждение или нагревание также способствуют возникновению дополнительных напряжений, что в дальнейшем будет стремиться деформировать структуру пленка – подложка, в том случае, если коэффициенты термического расширения пленки и ее подложки различны. Это дополнительное напряжение называется термическим напряжением, его характер и величина зависят от разности термических коэффициентов подложки и пленки. Также стоит отметить, что у многих пленок существует остаточное внутреннее напряжение. Общее напряжение в пленке равно сумме всех внешних приложенных напряжений, термической и внутренней составляющих.

Общее напряжение может быть сведено к минимуму посредством технологических способов. Во многих системах внутреннее напряжение является доминирующим компонентом, и оно является предметом большинства исследований.

Развитие методов измерения механических напряжений обусловлено необходимостью контролировать величину механических напряжений в плёнках различных материалов, являющихся основой микроконструкций.

Измерение механических напряжений может осуществляться как в процессе получения плёнки, так и по его окончании. Выбор метода измерения определяется типом пленки, материалом подложки, а также конструкцией формируемого устройства [1].

Существующие методы измерения механических напряжений можно классифицировать в зависимости от используемого физического явления: дифракционные методы (рентгеновская дифракция или дифракция электронов), механические методы (измерение деформации подложки), электрические методы (измерение проводимости, емкости и других параметров системы, содержащей структуру «тонкая пленка–подложка»).

Для различных плёнок требуется индивидуальная разработка метода измерения механических напряжений в зависимости от материала, структуры, технологии формирования, а также конструкции изделия.

Постановка задачи. Для того чтобы измерить механические напряжения в тонких пленках, необходимо измерить радиус кривизны (рельеф) подложки с пленкой и без неё. Эту процедуру можно выполнить на микроинтерферометре В.П. Линника. Используя полученные данные радиуса кривизны, рассчитать σ по формуле:

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{\left(\frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_s}\right) \cdot E \cdot h_s^2}{6h_f(1-\nu)} \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{вн}}$ — величина механических напряжений, вносимых при проведении технологической операции, h_s — толщина подложки, h_f — толщина нанесенного слоя (пленки), R_f и R_s — радиусы кривизны поверхности пластины после и до проведения технологической операции соответственно, E — модуль Юнга материала пластины, γ — коэффициент Пуассона материала пластины.

Микроинтерферометр В.П. Линника МИИ-4 разработан для визуальной оценки и измерения высоты неровностей тонко обработанных поверхностей. Его принцип работы основан на явлении интерференции света. В поле зрения микроинтерферометра одновременно наблюдаются интерференционные полосы и исследуемая поверхность. Полосы смещаются, если на исследуемой поверхности имеется бугор или впадина.

Используются два светофильтра, благодаря которым получается монохроматический свет, они пропускают соответственно желтую и зеленую части спектра. Без светофильтра наблюдается интерференционная картина в белом свете. При работе в монохроматическом свете в поле зрения должны быть видны чередующиеся черные и светлые полосы.

Для того чтобы измерить толщину пленки, нужно определить высоту ступеньки на границе раздела пленка-подложка (см. рис. 1). И пленка, и подложка не должны иметь царапин, отслоений и сколов, попадающих в зону наблюдения. При правильной настройке микроинтерферометра в его поле зрения должны быть видны одновременно граница пленка-подложка и интерференционные полосы, изогнутые в местах, где проходит ступенька, причем интерференционные полосы должны быть ориентированы перпендикулярно к направлению ступеньки.

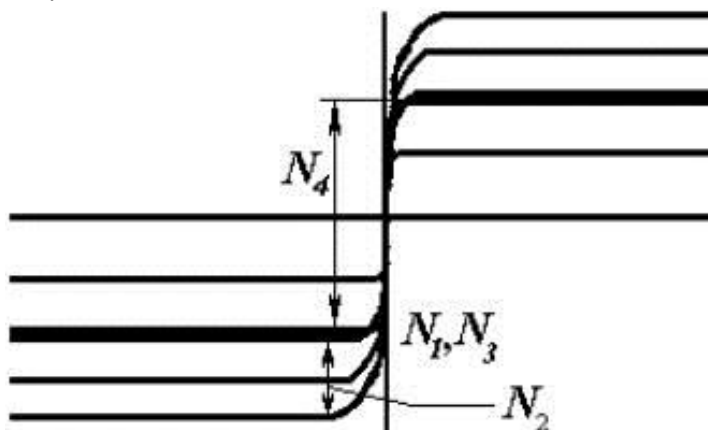


Рис.1. Изображение поля зрения в МИИ-4 и пример измерения отсчетов

При работе в зелёном свете искривление в одну интерференционную полосу соответствует высоте неровности на исследуемой поверхности, равной 0.273 мкм. Высота неровности h (в мкм) вычисляется по формуле:

$$h = 0.273 \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2} n \quad (2)$$

где N_1 — первый отсчет при измерении интервала между полосами; N_2 — второй отсчет при измерении интервала между полосами; N_3 — первый отсчет при измерении величины изгиба полосы; N_4 — второй отсчет при измерении величины изгиба полосы; n — число интервалов между полосами [2,3].

Вывод математического выражения для измерения радиуса кривизны подложки. Рассмотрим геометрию поверхности рабочей пластины, см. рис.2.

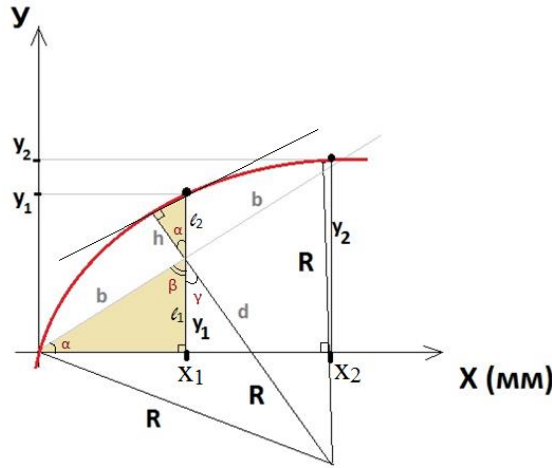


Рис.2. Геометрия поверхности для расчета радиуса кривизны

$$\tan \alpha = \frac{y_2}{x_2} ; \quad \beta = \frac{\pi}{2} - \alpha ;$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \beta = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} + \alpha = \alpha , \quad \text{значит } \gamma \equiv \alpha ;$$

$$\tan \alpha = \frac{l_1}{x_1} , \text{ значит } l_1 = x_1 \tan \alpha ,$$

$$\text{тогда } l_1 = \frac{x_1 y_2}{x_2} ;$$

$$\cos \alpha = \frac{h}{l_2} \quad l_2 \cong y_1 - l_1$$

$$h = l_2 \cos \alpha = (y_1 - l_1) \cos \alpha$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{x_2^2}{y_2^2}}} = \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}$$

$$h = \left(y_1 - \frac{x_1 y_2}{x_2} \right) \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}} = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}$$

$$b = \frac{l_1}{\sin \alpha} = \frac{x_1}{x_2} \sqrt{y_2^2 + x_2^2}$$

Конечная формула имеет вид:

$$R = \left(\frac{x_1}{x_2} \right)^2 \frac{(y_2^2 + x_2^2)^{\frac{3}{2}}}{2(x_2 y_1 - x_1 y_2)} \quad (3)$$

Методика измерения механических напряжений в тонких пленках на микроинтерферометре МИИ-4. Мы можем перемещать подложку на 10 мм. По смещению интерференционной картины определяем ординату в точках: 2,5; 5; 7,5; 10 мм до технологического процесса и после. Далее по этим измерениям строится график (рис.3). На данном графике мы можем наблюдать две кривые S и S_f. В S содержится радиус кривизны подложки, и неравномерность перемещения столика по оси Y соответственно. Затем так же находится радиус кривизны подложки с пленкой S_f.

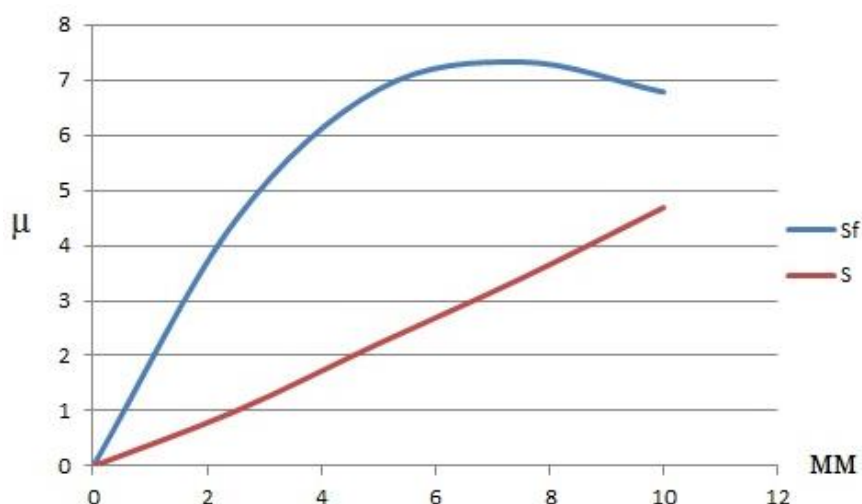


Рис.3. S – до напыления, Sf – после напыления

Для нахождения истинного радиуса кривизны подложки, вызванной воздействием пленки, необходимо вычислить ординаты кривой, то есть вычесть данные первой пленки из второй и построить зависимость. Получаем кривую, сегмент которой близок к окружности (см. рис. 1). Исходя из этого сегмента, вычисляется радиус кривизны. Тогда в формуле (2) можно исключить $(1/R_s) = 0$. Конечная формула имеет вид:

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{\frac{1}{R_f} \cdot E \cdot h_s^2}{6h_f(1-\gamma)} \quad (4)$$

Экспериментальная часть. Тонкие пленки AlN осаждались на ситалловую подложку в атмосфере азота. В работе для получения пленок AlN применялась установка планарного магнетрона на постоянном токе. Использовалась мишень диаметром 150 мм из Al (99,995%). В таблице 1 предоставлены данные технологической операции, а также полученные значения механических напряжений для двух пленок.

Таблица 1

№	Источн ик питания по постоян ному току, Вт	Темпера тура подложк и °C	Давлен ие Ar+N ₂ , Па	Мощнос ть, Вт	Толщ ина плен ки h _f , мкм	Толщ ина подл ожки h _s , мкм	Пото к Ar, сccm	Пот ок N ₂ , сccm	Ско рост ь оса жде ния V, Å/се к	σ, ГПа
1	900	350	0,065	900	0,885 4	500	8	8	2,16 4	-3,521 сжим.
2				800	0,477 8				2,47 5	2,877 растяг.

Подложки №1 и №2 до проведения технологической операции описаны в **таблицах 2-3** и после проведения в **таблицах 4-5** соответственно.

Таблица 2

Подложка №1

X (мм)	0	2,5	5	7,5	10
S _{делений}	0	3	8	10	17
	0	4,5	8,5	11,5	17,5
	0	3	8	10	17
< S >	0	3,5	8,16	10,5	17,16
μ	0	0,955	2,228	2,866	4,686

Таблица 3

Подложка №2

X (мм)	0	2,5	5	7,5	10
S _{делений}	0	20	37	50	63
	0	20	37	50	63
	0	20	37	50	63
< S >	0	20	37	50	63
μ	0	5,46	10,101	13,65	17,199

Таблица 4

Подложка №1

X (мм)	0	2,5	5	7,5	10
S _{f,делений}	0	16,5	25,5	27,5	25,5
	0	16	24	25,5	23,5
	0	16,5	25,5	27,5	25,5
< S _f >	0	16,33	25	26,83	24,83
μ	0	4,459	6,825	7,325	6,779

Таблица 5

Подложка №2

X (мм)	0	2,5	5	7,5	10
S _{f,делений}	0	-21	-36,5	-44,5	-51,5
	0	-20	-36	-45,5	-52,5
	0	-21	-36,5	-44,5	-51,5
< S _f >	0	-20,666	-36,333	-44,833	-51,833
μ	0	-5,642	-9,919	-12,239	-14,1505

Измерения проводились на МИИ – 4. Для достоверности проводилось трехкратное измерение для более точного вычисления радиуса кривизны.

Для расчета механических напряжений в тонких пленках потребовалось произвести расчет радиуса кривизны подложки до напыления пленки и после, используя описанное выше математическое выражение для измерения радиуса кривизны подложки (3).

Благодаря полученным результатам было посчитано механическое напряжение по формуле (4) в двух пленках, данные которых были представлены ранее в таблицах (1 - 5).

Заключение. В данной работе было проведено измерение механических напряжений в тонких пленках AlN. Установлено, что описанные в работе пленки обладают как растягивающим, так и сжимающим напряжениями. Расчет σ проводился с использованием данных о радиусе кривизны, формула для вычисления которого была выведена. Отметим, что в этой работе также была разработана методика измерений механических напряжений в тонких пленках на МИИ – 4 В.П. Линника.

Библиографический список

1. Майссел Л., Глэнг Р. Технология тонких пленок. В 2 т. Т 2. / пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. М.: Сов. радио, 1977. 768 с.
2. Кафедра ФТЭМК. МИИ-4 измерение толщины пленки. М.: МЭИ URL: <http://ftemk.mpei.ru/ncs/ips/mii4.htm> (дата обращения: 3.04.2018)
3. Уникальная база студенческих работ 5fan.ru. НТУУ «КПИ». Измерение толщины металлических пленок с помощью интерферометра МИИ-4. ID: 42374. URL: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=42374> (дата обращения: 3.04.2018).
УДК 621.313.82

А.А. Татевосян, Е.Г. Андреева

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ В МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ И КЛАССИФИКАЦИЯ МАШИН

Аннотация. Применение высококоэрцитивных постоянных магнитов в электромеханических системах определяет ряд преимуществ по сравнению с традиционно применяющимися электромеханическими преобразователями, таких как повышение энергетических характеристик при одинаковых массогабаритных параметрах, отсутствие необходимости во внешних источниках для возбуждения магнитного поля, высокая технологичность сборки, обусловленная простотой конструкции. Цель исследования: разработка конструкции магнитоэлектрической машины (МЭМ), работающей в режимах генератора и двигателя, и оценка критериев энергоэффективности этих машин для решения задач оптимизации их конструкций. Результатами исследования на данном этапе являются: выбор признаков классификации МЭМ и построение этой классификации с учетом магнитных характеристик электротехнических сталей, постоянных магнитов на основе редкоземельных материалов, аморфного железа.

Ключевые слова: высококоэрцитивный постоянный магнит, электрическая машина, магнитоэлектрическая машина, электромеханический преобразователь, классификация, критерии энергоэффективности, оптимизация конструкции.

На современном этапе развития общества магнитоэлектрические машины используются в качестве электромеханического преобразователя в таких отраслях народного хозяйства как энергетическая, топливная, химическая, медицинская, авиа- и ракетостроение, машиностроение, сельскохозяйственное производство и многих других. Это связано с широким кругом задач, решаемых ими. Большое многообразие форм конструктивных исполнений магнитоэлектрических машин в широком диапазоне мощностей обусловлено ставшими доступными по стоимости высококоэрцитивными постоянными магнитами, используемыми в этих машинах. Это делает внедрение рассматриваемых электротехнических устройств экономически целесообразным, не требующим дополнительных затрат, связанных с использованием источника питания постоянного тока для системы возбуждения индуктором магнитного поля (потока).

Магнитоэлектрическая машина (МЭМ) – это электрическая машина постоянного или переменного тока, в которой постоянный магнитный поток создается постоянными магнитами, при этом постоянные магниты могут быть неподвижными, а могут перемещаться в зависимости от конструкции машины.

Традиционно классификация электромеханических преобразователей может быть проведена для работы в режиме двигателя или генератора, однако, такое распределение является недостаточным, так как ряд магнитоэлектрических машин по своему назначению может работать в двух режимах, например, управляемый магнитоэлектрический амортизатор.

Классификация по конструктивным параметрам является более целесообразной, однако широкое многообразие форм технической реализации магнитоэлектрических машин обусловит очень разветвленную структуру классификации, что значительно усложнит анализ классификации и создаст трудности при определении общих признаков.

Объединение магнитоэлектрических машин по области применения, ввиду значительного количества решаемых практических задач, также обусловит сложную структуру классификации, требующей учета условий эксплуатации, например, необходимость повышенной степени защиты и способов охлаждения.

Также классификацию можно проводить по типу физического взаимодействия, например, постоянный магнит – постоянный магнит (широко применяется при решении задач магнитного подвеса), постоянный магнит – проводник с током (характерно для вращающихся, линейных, магнитоэлектрических приводов колебательного движения).

Рассмотренные выше признаки могут использоваться при создании общей классификации в ограниченном объеме.

Классификация магнитоэлектрических машин представлена на рис. 1.

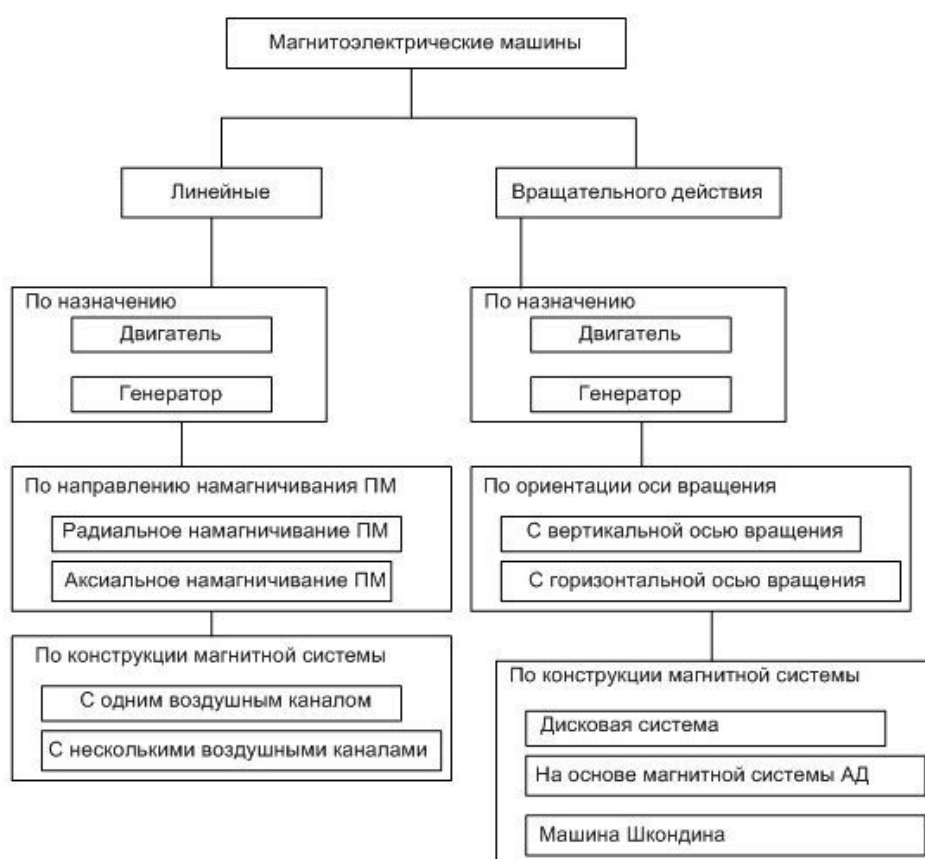


Рис. 1. Классификация магнитоэлектрических машин по предлагаемым признакам

Критерии энергоэффективности магнитоэлектрической машины

Улучшение пусковых и эксплуатационных характеристик магнитоэлектрической машины связано с определенными функциональными характеристиками, определяемыми

техническим заданием: максимальный развиваемый момент, минимальный момент страгивания, минимальная масса активной части, максимальный КПД, максимальная мощность, высокая жесткость внешней или механической характеристики.

Основные тенденции в области создания магнитоэлектрических машин [1]:

- применение постоянных магнитов на основе редкоземельных металлов, в частности Nd-Fe-B, обладающих высокими магнитными свойствами (коэрцитивная сила до 1000 кА/м, остаточная индукция до 1.4 Тл);
- применение улучшенных марок электротехнической стали. Марки холоднокатаной стали имеют большую магнитную проницаемость по отношению к горячекатаной, возможно применение аморфного железа [2];
- использование изоляции обмоточных проводов позволяет существенно повысить коэффициент заполнения обмоточного пространства;
- улучшение системы охлаждения, допускающее не только традиционное повышение производительности вентиляторов и увеличение площади поверхности охлаждения, но и применение жидкостного охлаждения корпусов магнитоэлектрических машин.

При указанных критериях общим критерием оптимальности является минимум приведенных затрат на изготовление и эксплуатацию магнитоэлектрической машины за нормативный срок окупаемости.

Во многих случаях достижение минимума массы конструкции вступает в противоречие с другими направлениями рационализации, например, сокращение времени разгона магнитоэлектрической машины достигается за счет увеличения питающего напряжения, что, в свою очередь, приводит к повышенному нагреву обмотки и, как следствие, снижению надежности магнитоэлектрической машины.

Развитие автономных систем, характерных для нужд малой энергетики, характеризуется следующими особенностями:

- ослабление реакции якоря и повышение жесткости внешней характеристики;
- уменьшение момента страгивания. Большое значение указанный показатель имеет для ветроэнергетических установок, так при низкой скорости ветра 2-4 м/с момент страгивания превышает момент вращения ветроколеса, что приводит к останову подвижной части генератора;
- обеспечение работоспособности при резкопеременных нагрузках;
- обеспечение работы параллельно с сетью;
- синусоидальность формы кривой напряжения или ограничения на пульсации выпрямленного напряжения;
- высокое качество электрической энергии.

К электроприводам предъявляются требования:

- обеспечение максимального КПД в установившемся и переходном процессах;
- обеспечение максимального развиваемого тягового или прижимного усилия;
- работоспособность при отклонениях параметров питающей сети;
- уменьшение искажения на питающую сеть.

Формирование требований к выходным параметрам магнитоэлектрической машины является важной задачей при проектировании конструкции магнитоэлектрической машины. Наиболее характерными критериями являются:

- уменьшение массогабаритных показателей;
- обеспечение жесткости внешней характеристики;
- возможность обеспечения генераторного и двигательного режимов в одном агрегате, например, работа управляемого магнитоэлектрического амортизатора;
- высокая механическая прочность узлов машины;

- ограничение электромеханической постоянной времени.

Целью оптимизации является достижение рассматриваемых критериев без серьезного увеличения затрат на изготовление магнитоэлектрической машины.

Особое значение при оптимальном проектировании магнитоэлектрических машин отводится задаче исследования индукции магнитного поля в зазоре, однако, оптимизация в этой области имеет известные ограничения, связанные с тем, что остаточная индукция современных постоянных магнитов не превышает 1,4 Тл.

Заключение. Специфическими для магнитоэлектрических машин факторами, влияющими на улучшение пусковых и эксплуатационных характеристик, являются конструктивные решения, направленные на повышение качества процессов энергопреобразования в магнитной системе. Новые технические решения должны улучшать процессы энергопреобразования при одновременном упрощении конструкции и технологии изготовления как отдельных частей магнитоэлектрической машины, так и ее сборки в целом.

Библиографический список

1. Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Герасин А. А. Экспериментальные исследования высокооборотных генераторов с магнитопроводом статора из аморфного железа // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 12. С. 3-11.

2. Андреева Е. Г., Березовский А. В. Исследование влияния магнитных свойств материала и размеров на силовые характеристики магнитного поля трансформатора тока // Актуальные проблемы современной науки: материалы VI Регион. научно-практич. конф. с межд. участием (Омск, 28 апр. 2017 г.) / ОмГТУ. Омск, 2017. С. 71-74. URL: https://omgtu.ru/general_information/faculties/radio_engineering_department/departament_of_quot_physics_quot/File/2/APSN_2017.pdf

УДК 372.853

С.В. Тучков, Л.В. Рабчук, И.В. Александров

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

О МОДЕРНИЗАЦИИ РАБОЧИХ ПРОГРАММ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ФИЗИКА» В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ФГОС 3+ И КУРС «СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА» В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Аннотация. Отмечено, что курс «Современная физика» может способствовать повышению интереса к получению качественного инженерного образования. Показано, что интенсификация процесса обучения с использованием новейших образовательных технологий обеспечивает достаточно глубокую естественно-научную подготовку.

Ключевые слова: ФГОС 3+, «Современная физика», балльно-рейтинговая система, учебно-методическое обеспечение.

С 2016-2017 учебного года студенты всех направлений подготовки бакалавров и специалистов Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ), изучающие дисциплину «Физика», занимаются по модернизированным федеральным образовательным стандартам ФГОС 3+.

Согласно новым учебным планам на изучение дисциплины «Физика» отводится от 8 (2-хсеместровый курс) до 12 (3-хсеместровый курс) зачетных единиц, что составляет от 120

до 200 аудиторных часов. Такое количество часов позволяет лишь осветить основы классической физики и достижения первой половины XX века, но не уделять достаточно внимания взглядам и методам современной физики. Для устранения этого недостатка на кафедре физики УГАТУ разработана учебная программа по дисциплине «Современная физика». В нее входят следующие разделы: «Физический эксперимент», «Нелинейная оптика», «Физика новых материалов и технологий», «Строение и динамика молекул, атомов и ядерной материи».

Изучение этих разделов позволит повысить качество общенаучной и научно-технической подготовки выпускников, ликвидировать возникший разрыв между достигнутым уровнем современной физики и курсом общей физики, преподаваемым в техническом университете.

Задачей курса «Современная физика» является изучение важнейших открытий в области физики на рубеже XX-XXI веков и применение их в науке и технике. При этом общим для нового этапа развития физики является единый и вместе с тем принципиально новый квантово-механический характер явлений и процессов, происходящих в областях размерами в нанометры.

Учитывая значимость последних достижений физики для развития высокотехнологических производств, введение курса современной физики будет способствовать повышению интереса к получению качественного инженерного образования и поможет молодым специалистам успешно работать по избранной специальности.

Кафедра физики обеспечивает преподавание для всех направлений подготовки. Рабочие программы включают материал всех разделов физики, но степень углубления изучения отдельных подразделов и тем, содержание лекций, практических занятий, подборка лабораторных работ, содержание самостоятельной работы студентов определялись кафедрой с учетом специфики направлений подготовки.

В отличие от ФГОС ВПО в ФГОС ВО не прописаны знания, умения и навыки, которые должны приобрести обучающиеся при изучении дисциплины, а указана только структура программы. Это позволяет кафедре самостоятельно, учитывая особенности выпускающих кафедр, формировать содержательную часть программы.

В целях подготовки выпускников в соответствии с требованиями стандарта на кафедре физики широко используются активные и интерактивные формы проведения занятий: лекции проходят с использованием презентаций, выдаются индивидуальные задания, на практических занятиях проводится бланочное тестирование, в лабораторном практикуме активно применяется современное программное обеспечение («Конструктор тестов», «LabVIEW», CASSY Lab и т.д.). Лекции и практические занятия для бакалавров представлены в виде электронных учебников и пособий [1].

В ФГОС ВО нет прямого требования по включению в программу бакалавриата лабораторных практикумов и практических занятий по физике и другим дисциплинам, умения и навыки по которым иначе как на практике не могут быть сформированы. Необходимость же таких занятий обосновывается следующим образом: во-первых, в ФГОС ВО указано, что количество лекционных занятий должно составлять не более 50 % от общего количества часов аудиторных занятий для квалификации «академический бакалавр» и не более 40 % для квалификации «прикладной бакалавр». Следовательно, часть оставшегося количества часов может быть использована для проведения практических и лабораторных занятий. Во-вторых, в ФГОС ВО регламентируется, что вуз должен располагать материально-технической базой для проведения лабораторной и практической работы учащихся, т. е. подразумевается ее наличие. В процессе изучения дисциплины «Физика» студенты УГАТУ выполняют лабораторные работы в 7 учебных лабораториях кафедры, в которых имеется около 150 работ, в том числе виртуальных и исследовательского характера. Лабораторная база кафедры постоянно модернизируется и оснащается новым современным оборудованием.

Количество и тематика лабораторных работ позволяет сформировать из них профессионально-ориентированные циклы, выполнив которые, студенты приобретают компетенции, необходимые в их конкретной дальнейшей деятельности.

Подробно в ФГОС ВО изложены требования к учебно-методическому обеспечению. Упомянуты электронно-библиотечные системы и профессиональные базы данных, информационные справочные системы и лицензионное программное обеспечение. Вышеуказанное учебно-методическое обеспечение активно используется на кафедре физики УГАТУ: виртуальные лаборатории, программы для моделирования молекулярных систем, программы для контроля знаний студентов и т.д. Содержание учебной дисциплины в полной мере представлено на сайте университета: содержание теоретической части, проверочные задания и тесты, контрольно-измерительные материалы по дисциплине, методические пособия по проведению практических занятий, методические указания при проведении лабораторных работ.

С целью повышения эффективности управления учебным процессом, в том числе самостоятельной работой студентов, оценка уровня освоения дисциплины «Физика» осуществляется с использованием балльно-рейтинговой системы [2]. Балльно-рейтинговая система активизирует студентов, повышает их мотивацию к получению знаний, позволяет учитывать индивидуальные особенности обучающихся и получать документированную информацию о выполнении каждым студентом всех видов контролируемой деятельности. В рабочей программе подробно описаны критерии оценки текущей и промежуточной успеваемости студентов, обучающихся по различным направлениям подготовки.

Таким образом, опыт организации учебного процесса на кафедре физики УГАТУ показывает, что интенсификация процесса обучения с использованием новейших образовательных технологий, структурирование учебных программ по направлениям подготовки бакалавров и специалистов позволяют обеспечить глубокую естественнонаучную подготовку значительной части студентов.

Библиографический список

1. Александров И. В., Строкина В. Р., Афанасьева А. М., Тучков С. В. Об опыте преподавания дисциплины «Физика» в условиях уровневого обучения // Инновации в образовании. 2015. № 9. С. 4–10.
2. Александров И. В., Строкина В. Р., Афанасьева А. М., Тучков С. В. Совершенствование качества образования с помощью балльно-рейтинговой системы при изучении дисциплины «Физика» // Технологии и организация обучения / Уфимский государственный авиационный технический университет. Уфа, 2011. С. 8–11.

УДК 536.51.083

А.В. Чернышова, А.И. Щелканов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ВЫБОР ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Аннотация. В работе определены необходимые параметры и рассмотрены вопросы использования аппаратных средств измерения температуры в целях контроля эффективности

работы систем охлаждения. Проведён анализ метрологических характеристик существующих датчиков.

Ключевые слова: теплообмен, система охлаждения, температура, датчик, измерение.

Высокие темпы развития электронных технологий, создание новых классов полупроводниковых приборов с расширением сфер их применения приводят к значительному увеличению выделяемой ими тепловой энергии, вследствие чего затрудняется обеспечение приемлемых температурных режимов в приборных отсеках и блоках. Увеличение температуры узлов технического устройства может привести к ухудшению изоляционных свойств отдельных материалов, изменению плотности и подвижности носителей тока в полупроводниках, снижению индуктивности в сердечниках, общему увеличению интенсивности процесса старения материалов. Всё это может привести к некорректной работе оборудования или выходу ее из строя. В связи с этим нормальный тепловой режим является необходимым, хоть и не единственным, условием надёжного функционирования приборов и комплексов [1].

Тепловой режим технических устройств зависит от таких факторов, как мощность и пространственное распределение активных источников энергии, конструкция и габариты устройства, физические свойства материалов, параметры окружающей среды. Таким образом, для обеспечения поддержания нормального режима работы необходимо выбрать оптимальную систему охлаждения.

Основная задача систем охлаждения состоит в интенсификации процесса теплообмена (теплопередачи), то есть переноса тепловой энергии из одной части устройства в другую или в окружающую среду. Количественным параметром для оценки данного процесса будем считать тепловой поток, который можно рассчитать с помощью основного закона теплопередачи:

$$Q = \alpha F \Delta t,$$

где α – коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; F – площадь поверхности теплообмена, м^2 ; Δt – разность температур.

Если первые два параметра задаются при проектировании системы охлаждения, а потому не нуждаются в измерении, то температуры охлаждаемого объекта, теплоносителя, теплообменника и окружающей среды могут и должны быть измерены с весьма высокой точностью.

Выбор методов и средств контроля температуры должен осуществляться с учетом поставленной задачи, необходимой точности и условий измерения, а также экономических соображений. При этом необходимо иметь в виду ту точность, которую приборы могут обеспечить в данных условиях эксплуатации [2].

Жидкостные стеклянные термометры, основанные на принципе теплового расширения термометрической жидкости, применяются для измерения температуры в диапазоне от -200 до $+750$ $^{\circ}\text{C}$. Основные достоинства: простота конструкции и весьма высокая точность. Недостатки: малая механическая прочность, не всегда приемлемая читаемость шкалы и невозможность применения автоматизации измерений и организации телеизмерений, большая инерционность.

Действие манометрических (конденсационных) термометров основано на зависимости давления заполнителя термосистемы от температуры измеряемой среды. Применяются при измерении температуры в стационарных условиях в интервале от -269 до $+600$ $^{\circ}\text{C}$. Преимущества: относительная простота конструкции и монтажа на объекте, возможность организации дистанционного измерения и автоматизации регистрации, взрывобезопасность, нечувствительность к внешним магнитным полям. Недостатками

являются относительно невысокая точность измерения – класс точности 1.5; 2.5; 4.0 (реже 1.0), небольшое расстояние дистанционной передачи показаний и трудности ремонта при разгерметизации измерительной системы.

Принцип действия термоэлектрических преобразователей (термопар) основан на преобразовании тепловой энергии в термо-ЭДС элемента при наличии разности температур между холодным и горячим спаями. Используются совместно с милливольтметрами и потенциометрами.

Термопары из благородных металлов применяют при температурах от +400 до +1600 °С для непрерывных измерений и до +1800 °С для кратковременных. Преимуществами преобразователей данного типа являются возможность применения при высоких температурах, большая устойчивость к агрессивным средам, высокая точность и значительный диапазон измерений. Недостаток – относительно малые значения развиваемой термо-ЭДС.

Термопары из неблагородных металлов применяют для измерения температур от -250 до +1000 °С. Их достоинства: большая величина развиваемой термоЭДС, устойчивость к окислительной среде.

Термопары из тугоплавких металлов и их сплавов применяются для измерения температуры от +1300 до +2500-3000 °С. Основными достоинствами являются высокая температура плавления, химическая устойчивость при высоких температурах в защитной атмосфере. Недостатки: необходимость тщательной защиты от окисления и агрессивных сред, индивидуальной градуировки.

Принцип действия термопреобразователей сопротивлений основан на пропорциональном изменении его электрического сопротивления в зависимости от температуры. Применяются для измерений в диапазоне от -269 до +750 °С. Рабочим органом является чувствительный термоэлемент из платиновой, медной или никелевой проволоки. Применяются в комплекте с логометрами, автоматическими уравновешенными мостами и компенсационными приборами.

Основные достоинства: высокая точность, возможность осуществления автоматизации и дистанционной передачи показаний, централизации контроля температуры, относительная простота интегрирования в информационно-вычислительные структуры. Недостатки: необходимость использования прецизионного источника питания, относительно большие размеры чувствительного элемента, значительная инерционность, сложность устройства вторичных приборов.

Терморезисторы – термопреобразователи сопротивления, чувствительные элементы которых изготавливаются из полупроводниковых материалов, что обеспечивает их более низкую стоимость. Диапазон измеряемых температур составляет от -60 до +300 °С, может быть расширен от -200 до +1000 °С. Различают два типа: с отрицательным и положительным температурным коэффициентом сопротивления.

Преимущества: широкий диапазон значений сопротивления, широкий интервал температур в твердых, жидких и газообразных средах, широкий выбор форм и размеров, способность выдерживать электрические и механические перегрузки. Основными недостатками являются нелинейность температурной характеристики сопротивления, необходимость индивидуальной градуировки [3].

Кварцевые датчики температуры являются автогенераторными преобразователями с частотным выходом и строятся на основе пьезорезонаторов с сильной зависимостью частоты от температуры. Предназначены для измерений постоянных и медленноменяющихся температур в диапазоне от -250 до +250 °С [4].

Основные достоинства: высокая точность, воспроизводимость, стабильность и разрешающая способность, удобство эксплуатации и автоматизированность измерительной температуры. Недостатки: тепловая инерционность, индивидуальная НСХ.

Альтернативой описанным приборам являются бесконтактные средства измерения. Принцип действия приемников оптического излучения основан на появлении теплового поля в термочувствительном элементе в результате поглощения потока излучения и, как следствие, повышению его температуры. Подразделяются на термоэлементы, болометры, оптико-акустические приемники, пироприемники, приемники на термоупругом эффекте пьезокристалла, калориметры, тепловые преобразователи изображения. Применяются преимущественно для дистанционного контроля чрезвычайно горячих объектов. Диапазон измеряемых температур теоретически неограничен.

Основные преимущества: позволяют производить измерения температуры движущихся объектов, расположенных в труднодоступных местах, избегать повреждений средства измерения при контроле высоких температур, предотвращать возможные загрязнения и повреждения измеряемого объекта, при измерении температуры объекта, целостность или стерильность которого нельзя нарушать. Недостатки: зависимость показаний от расстояния до измеряемого объекта, от отражательных свойств измеряемой поверхности, от излучения прямо не попадающих в поле зрения приемника областей измеряемого объекта.

На основании рассмотренных недостатков перечисленных датчиков приходим к выводу, что наиболее пригодными для измерения параметров теплообмена в системах охлаждения являются платиновые термопреобразователи сопротивления, предназначенные для длительных измерений и позволяющие автоматизировать их процесс. В некоторых случаях в целях экономии, в том числе пространства, могут быть применены полупроводниковые датчики [5].

Библиографический список

1. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. М.: Советское радио, 1976. 232 с.
2. Автоматизированная система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учетом внешних воздействий / под ред. А. С. Шалумова. М.: Радиотехника, 2013. 424 с.
3. Крамарухин Ю. Е. Приборы для измерения температуры. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
4. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики / 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
5. Мэклин Э. Д. Терморезисторы. М.: Радио и связь, 1983. 208 с.

УДК 371.321.8

А.Ф. Шишкина, Е.В. Трофимова

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРОБЛЕМ УЧАЩИХСЯ СРЕДНЕГО ЗВЕНА В ОСВОЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ФИЗИКА», ВЫЯВЛЯЕМЫХ НА ОЛИМПИАДАХ

Аннотация. В данной статье проводится анализ основных ошибок учащихся 7-8 классов, принимавших участие в олимпиаде по физике на Кубок имени Ю.А. Гагарина в Уфимском государственном авиационном техническом университете. Рассматриваются возможные причины обнаруженных ошибок и способы их исправления.

Ключевые слова: олимпиады, физика, абитуриенты, профориентационная работа, олимпиады по физике, анализ результатов.

В рамках профориентационной работы со школьниками и с целью привлечения для поступления наиболее подготовленных абитуриентов в Уфимском государственном авиационном техническом университете проводится ряд олимпиад по физике для учащихся 7-11 классов, в подготовке и проведении которых активно участвуют преподаватели кафедры физики [1, 2, 3, 4]. В 2018 году наиболее массовыми оказались олимпиада на Кубок имени Ю.А. Гагарина (далее – Кубок Гагарина) для школьников 7-8 классов и открытая олимпиада на Кубок Ректора УГАТУ (далее – Кубок Ректора) для учащихся 9-11 классов. Анализ представленных на проверку работ выявил ряд основных проблем в освоении дисциплины «Физика» в рамках школьной программы, на которых хотелось бы остановиться в данной статье.

В первую очередь следует обсудить основные ошибки в работах с Кубка Гагарина, поскольку изучение физики начинается в большинстве школ с седьмого класса, и ошибки часто оказываются типичными. Затем эти ошибки нередко перетекают в более серьезные пробелы в изучении дисциплины, если вовремя не обратить на них внимание.

Итак, самая часто встречающаяся проблема – это невнимательное чтение самого задания. Например, в задаче может рассматриваться сплав, содержащий какой-то процент некоторого элемента по весу. Однако участники олимпиады почему-то рассматривают содержание по объему. Даже после того, как был проведен разбор решений самостоятельно или со своими школьными учителями, некоторые ребята подают на апелляцию, так и не разобравшись в своей ошибке.

Вторая проблема, возникающая у учеников 7-8 класса, это неспособность выполнить задание по предоставленной информации. Ответ на задачи такого рода часто содержится в информационном блоке, который надо внимательно прочитать, а затем проанализировать содержащуюся в нем информацию. Тем не менее, по ответам создается впечатление, что некоторые участники либо совсем не вникают в суть написанного, либо просто не читают предоставленную информацию. В случае, если с этой проблемой не удастся справиться в 7-8 классе, в конце 9 класса на итоговой аттестации в форме ОГЭ ребята не справятся или справятся недостаточно хорошо с соответствующим заданием на анализ текстовой информации.

Особую проблему всегда составляют задачи на анализ и применение графиков. На наш взгляд, это связано прежде всего с тем, что в школьном курсе физики мало времени уделяется на графические методы решения. Поэтому учащиеся слабо владеют приемами построения графиков и зачастую не умеют получать информацию из графиков. Однако графические методы решения являются мощным инструментом, который может в значительной степени облегчить решение задачи, сделать его более наглядным и простым. Кроме того, в литературе из области экспериментальной физики львиная доля информации дается именно в виде графиков. Приведем пример задачи для седьмого класса, в которой рисунок значительно упрощает решение задачи, но правильно нарисовали его только несколько участников олимпиады: «Легковой автомобиль движется со скоростью v_1 за грузовой машиной, скорость которой v_2 . В момент начала обгона водитель легкового автомобиля увидел встречный автобус, движущийся со скоростью v_3 . При каком наименьшем расстоянии до автобуса можно начинать обгон, если в начале обгона расстояние между легковой и грузовой машинами было S_1 , а к концу обгона должно быть S_2 , причём расстояние между легковой машиной и автобусом должно быть не менее S_3 . Длина легковой машины L_1 , грузовой – L_2 ».

Традиционно вызывают проблемы и задачи на статику – условие равновесия, рычаги, моменты сил не усваиваются учащимися в достаточной мере. Удивительно, но в 2017 году

ни один восьмиклассник на республиканском этапе не справился с заданием по нахождению построением центра тяжести фигуры. Возможно, это связано со сказанным в предыдущем абзаце, либо имеет место слабое понимание смысла понятия «центр тяжести».

В силу относительно слабой математической подготовки школьников среднего звена возникает проблема и при работе со степенями. Суть ее можно разобрать на примере задачи с республиканского этапа Кубка Гагарина в 2018 году для седьмого класса. Учащимся предлагалась следующая задача: «Планеты обращаются вокруг звёзд, спутники вокруг планет, подчиняясь закону всемирного тяготения, открытому английским учёным Исааком Ньютоном. Ещё до открытия этого закона немецкий астроном Иоганн Кеплер сформулировал законы движения планет на основании наблюдения за ними. Один из них гласит, что квадрат периода обращения планеты вокруг звезды пропорционален кубу большой полуоси эллипса – орбиты. Если орбита круговая, то большая полуось – это её радиус. Представим себе, что вокруг планеты обращаются два спутника, радиусы орбит которых относятся как 4:9. Пусть в некоторый момент спутники оказались на одном радиусе. Через сколько периодов ближнего к планете спутника они вновь окажутся на одном радиусе?». Условие задачи достаточно объемное, поэтому проблемы с чтением и анализом условия тут также проявляются. Однако многие ребята, правильно записывая в решении отношение периодов, совершенно забывают возведение в куб и во вторую степень.

Относительно учащихся 7-8 класса можно заметить также то, что более половины участников заключительного этапа не проводят преобразования в общем виде, предпочитая делать промежуточные вычисления или вовсе решая задачи «математически», через неизвестную x . В этом нет ничего плохого на начальных этапах освоения предмета, однако желательно с самого начала приучать учащихся решать задачи в общем виде. В таком решении чётко проявляется физический смысл полученного результата и имеется возможность оценить его достоверность, например, по размерности. Также можно проанализировать результат решения для разных исходных данных.

В целом следует отметить, что в начале изучения предмета очень важен качественный разбор явлений. Тем, кто работает с учащимися на начальных этапах изучения физики, следует добиваться, чтобы ученики стремились понять суть физических явлений и процессов, а не просто решали задачи «по формуле». Глубокое понимание физики на начальном этапе ее освоения является крепким фундаментом для дальнейшего изучения этой дисциплины как в старшем звене школы, так и в университете [5, 6]. Качественный разбор должен войти в привычку, также как проверка математических преобразований по размерности конечного результата. Для достижения наилучшего результата следует решать больше разноплановых задач, не жалея времени на их качественное обсуждение и стараясь применять разнообразные способы решения, в том числе графические.

Библиографический список

1. Шишкина А. Ф., Трофимова Е. В., Александров И. В. Олимпиадные задачи по физике с техническим содержанием // Теория. Практика. Инновации. 2017. № 11 (23). С. 46–50.
2. Шишкина А. Ф., Трофимова Е. В., Александров И. В. О разработке физических задач с техническим содержанием для олимпиад школьников // Проблемы современного физического образования: Материалы IV Всероссийской научно-методической конференции. / РИЦ БашГУ. Уфа, 2017. С. 185–187.
3. Шишкина А. Ф., Трофимова Е. В., Александров И. В. Особенности подбора заданий для физических олимпиад школьников // Физика в системе высшего и среднего образования России: Тезисы докладов Международной школы-семинара / АПР. М., 2017. С. 144–146.

4. Александров И. В., Шишкина А. Ф., Трофимова Е. В., Осипов В. С. Об участии преподавателей технического университета в предметных олимпиадах школьников // Преподавание физико-математических и естественных наук в школе. Традиции и инновации: материалы Всероссийской научно-методической конференции. Нижний Новгород, 2017. С. 28.

5. Шишкин Ф. Т., Шишкина А. Ф. Реализация компетентного подхода в высшем профессиональном образовании // Современные проблемы науки и образования в техническом вузе: материалы II Международной научно-практической конференции (25-27 июня 2015 года, г. Стерлитамак). Ч.2. / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 2015. С. 190–195.

6. Шишкин Ф. Т., Шишкина А. Ф. Компетентный подход в высшем профессиональном образовании // Современные проблемы науки и образования в техническом вузе: материалы Всероссийской научно-практической конференции (24-26 июня 2013 года, г. Стерлитамак) / УГАТУ. Уфа, 2013. С. 283–288.

УДК 372.853:355.23

Е.В. Шлякова, Н.А. Толмачева

Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия

РОЛЬ СИТУАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ ВОЕННЫХ ВУЗОВ

Аннотация. В статье рассматривается проблема формирования информационных компетенций обучающихся военных вузов путем включения в процесс обучения физике ситуационных задач, приведены авторские варианты ситуационных задач, показаны уровни сформированности информационных компетенций обучающихся в соответствии с уровнями успешности работы с ситуационными задачами.

Ключевые слова: процесс обучения физике, ситуационные задачи, информационные компетенции, военный вуз.

В соответствии с требованиями ФГОС ВПО последнего поколения в процессе изучения физики обучающийся вуза должен научиться анализировать и объективно оценивать квазипрофессиональные ситуации, связанные с физическими процессами и явлениями, лежащими в основе работы вооружения и военной техники, уметь работать с измерительными приборами, использовать различные методики физических измерений, иметь навык выполнения физического моделирования с применением методов физико-математического анализа [1].

Решение качественных и расчетных задач является важной составной частью процесса обучения физике в высшей военной школе. В процессе решения физических задач происходит развитие интеллектуальных умений обучающихся, в том числе и критического мышления, формируются и развиваются навыки самостоятельной работы, активизируется познавательная активность.

Для умения решать физические задачи требуется систематическая деятельность по овладению стандартными алгоритмами решения базовых типовых заданий, а также логикой и методикой выделения стандартных элементов в комплексных задачах. Физические задачи могут выполнять ещё одну функцию, особенно значимую для обучающихся военных вузов. Задачи могут стать источником информации, практически значимой в профессиональной

деятельности будущих военных инженеров, они могут моделировать реальные ситуации, когда информация, полученная в ходе их решения, служит обоснованием для конкретных действий будущего военного специалиста.

В практике обучения физике военного вуза курсантам предлагаются задачи, которые можно разделить на несколько типов [3]:

- традиционные типовые задачи, при разработке которых широко используется принцип фасетности, для того чтобы каждый обучающийся в группе получил своё индивидуальное задание, основной целью решения таких задач является выработка у курсантов базовых алгоритмов и общих подходов;

- усложненные задачи, требующие помимо владения алгоритмическими навыками еще и способности к анализу текста задачи для понимания её физической сущности;

- ситуационные задачи, содержание которых связано с реалиями будущей профессиональной деятельности военных специалистов.

Ситуационная задача – это средство обучения, включающее совокупность условий, направленных на решение практически значимой ситуации с целью осознанного усвоения обучающимися содержания учебной дисциплины.

В настоящее время выпускник школы испытывает затруднения, сталкиваясь с конкретными физическими процессами и явлениями в природе и реальной жизни, имеет низкий уровень сформированности универсальных учебных действий, основным из которых является умение работать с информацией, представленной в текстах, таблицах, диаграммах или рисунках. Возникает противоречие между стабильным содержанием учебного материала работы по физике и необходимостью формирования умения работать с информацией в военном вузе, объем которой постоянно возрастает. Для разрешения данного противоречия большим дидактическим потенциалом обладает использование в учебном процессе военного вуза ситуационных задач по физике.

Приведем примеры традиционных и ситуационных физических задач.

Традиционные задачи:

1. Тело массой 2 кг брошено в поле тяжести Земли под углом 45° к горизонту с начальной скоростью 20 м/с. На какую максимальную высоту поднимется тело? Принять ускорение свободного падения равным 10 м/с^2 . Сопротивлением воздуха пренебречь.

2. Определить среднюю длину свободного пробега молекул и число соударений за 1 с, происходящих между всеми молекулами азота в сосуде емкостью 4 л, содержащегося при нормальных условиях.

3. Лампа, сила света которой 200 кд, укреплена на потолке. Рассчитать освещенность пола помещения падающими перпендикулярно световыми лучами, если расстояние от лампы до пола равно 5 м.

Ситуационные задачи:

1. Из зенитной пушки калибра 57 мм был выпущен снаряд массой 2,8 кг. Толщина стальной оболочки снаряда 8 мм, масса взрывчатого вещества снаряда 210 г. Определить механическую энергию снаряда по отношению к Земле в верхней точке его траектории, если выстрел произведен под углом 45° к горизонту, начальная скорость снаряда 1000 м/с, частота вращения снаряда в полете равна 160 с^{-1} . Форму снаряда считать цилиндрической с закрытыми торцами, сопротивлением воздуха пренебречь.

2. Для инфракрасной подсветки местности при наблюдении через ночной прицел наводчика и прибор ночного видения командира танка используется прожектор Л-2Г, обеспечивающий высокую концентрацию светового потока. Рассчитать освещенность поверхности лучами прожектора, падающими перпендикулярно, если сила света источника составляет $15 \cdot 10^6$ кд, а расстояние от него до поверхности составляет 120 м.

3. Определить длину свободного пробега продуктов сгорания пороха в канале ствола винтовки калибра 7,62 мм и длиной 73 см, если газ при температуре 800°C оказывает на

пулю давление 10 МПа. Принять молярную массу пороховых газов равной молярной массе воздуха. Средний диаметр молекул составляет 0,35 нм.

Физический смысл этих задач одинаков, но через ситуационные задачи обучающиеся понимают, как они могут использовать знания, полученные в процессе изучения физики, в будущей профессиональной деятельности. В традиционных задачах по физике говорится только лишь о физических процессах и явлениях, а в ситуационных же задачах речь идет о процессах, протекающих при эксплуатации вооружения и военной техники в конкретных условиях. В процессе работы над такой задачей обучающемуся приходится самостоятельно осмысливать механизм протекающего физического процесса, выявлять сущность физического явления. Это значительно усложняет решение, так как заставляет искать необходимую информацию в различных источниках и делать выводы на основе ее анализа.

Прослеживается зависимость между уровнями успешности обучающихся в работе с ситуационными задачами и уровнями сформированности умения работать с информацией. Данное умение можно оценить при помощи тестов, предложенных И.С. Фишман [2]. Для выделения уровней сформированности умения курсантов работать с информацией (репродуктивного, частично-поискового, эвристического, исследовательского) определяются проверяемые критерии (работа с различными источниками и видами информации, извлечение и систематизация информации, анализ информации, выводы на ее основе, представление информации). Разработка критериально-оценочного аппарата успешности курсантов 2 курса в работе с ситуационными задачами проведена на основе анализа результатов практических и лабораторных занятий по физике. В итоге были выделены три уровня: I – обучающиеся умеют решать ситуационные задачи с подсказками (ответ содержится в тексте учебника, конспекта лекций или преподаватель задает наводящие вопросы); II – обучающиеся умеют решать ситуационные задачи, требующие самостоятельного поиска информации во внешних источниках; III – обучающиеся сами составляют ситуационные задачи (рис.1).

Репродуктивный и частично-поисковый	• Обучающиеся умеют решать ситуационные задачи с подсказками
Эвристический	• Обучающиеся умеют решать ситуационные задачи, требующие поиск информации во внешних источниках
Исследовательский	• Обучающиеся умеют составлять ситуационные задачи

Рис.1. Соответствие уровней успешности обучающихся в работе с ситуационными задачами и сформированности информационных компетенций

Итак, курсанты, умеющие составлять ситуационные задачи, имеют исследовательский уровень сформированности умения работать с информацией. При самостоятельном составлении ситуационных задач они работают с учебником, справочной литературой, публикациями средств массовой информации инженерно-технической направленности. Несомненно, самостоятельная работа невозможна без умения работать с информацией. Обучающийся должен свободно ориентироваться среди различных источников информации, владеть навыками ее переработки и представления.

Важно предлагать обучающимся решать и составлять ситуационные задачи с физическим содержанием как по темам курса физики, так и интегративной направленности. Для этого введены в содержание практических и лабораторных занятий по физике

ситуационные задачи военно-прикладной и технической направленности, основной дидактической целью которых является формирование умения работать с информацией и мотива к дальнейшему изучению физики. На подобного рода занятиях курсанты глубже раскрывают связь физики с дисциплинами военно-специальных кафедр, различными областями военно-профессиональной деятельности.

Таким образом, эффективность применения ситуационных задач для формирования умения обучающихся работать с информацией обеспечивается использованием ситуационных задач на всех этапах изучения физики, вовлечением обучающихся в процесс составления задач, в том числе в рамках самостоятельной работы.

Библиографический список

1. Толмачева Н. А., Шлякова Е. В. Разработка компетентностно-ориентированных фондов оценочных средств // Интеграция науки и практики в современных условиях: материалы VI Международной научно-практической конференции, 20 июня 2016 г. Москва, 2016. С. 55–58.
2. Фишман И. С. Тесты внешней оценки уровня сформированности ключевых компетентностей учащихся. Самара: ЦПО, 2005. 133 с.
3. Шлякова Е. В., Толмачева Н. А. Методологические принципы оценивания сформированности компетенций // Актуальные вопросы научных исследований: сборник научных трудов по материалам XII Международной научно-практической конференции, 15 мая 2017 г. Иваново, 2017. С. 58–62.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1 МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

1. *Б.Ш. Алимбаева, М.Ю. Байбарацкая, Д.А. Кокотько, Д.А. Пестряков*
Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва
(Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия
ПОВЕРХНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ4

2. *В.А. Безрукова, А.В. Туезов, Е.Е. Корниенко*
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧИСТОТЫ ПОРОШКА В₄С НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА
ОБРАЗЦОВ, СПЕЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО
СПЕКАНИЯ8

3. *Я.И. Бондаренко¹, Е.А. Белопухов^{1,2}, В.Ю. Трегубенко^{1,2}*
¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
²Институт проблем переработки углеводородов СО РАН, г. Омск, Россия
МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ НОСИТЕЛЕЙ
КАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ12

4. *И.Н. Градусов, П.А. Рябинкина, А.А. Никулина*
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В МНОГОФАЗНОЙ СТАЛИ,
ПОЛУЧЕННОЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ СПЕКАНИЕМ14

5. *А.В. Захаров*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
КАЛИБРОВКА ДАТЧИКА ТОЛЩИНЫ SYCON STC-2000A ДЛЯ МАГНЕТРОННОГО
РАСПЫЛЕНИЯ ЦИРКОНИЯ НА УСТАНОВКЕ ADVAVAC VSM-200.....18

6. *И.В. Иванов, Е.И. Ткаченко, Е.А. Руденя*
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ПОЛУЧЕННОЙ
МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ22

7. *Л.Ф. Калистратова, Д.И. Бергин*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
СТРУКТУРНЫЙ ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В СИСТЕМЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ CdSe –
ZnSe.....24

8. *Л.Ф. Калистратова, В.И. Суриков, П.А. Давидюк*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЭЛАСТОМЕРОВ,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ
ВОЛЬФРАМА.....29

9. М.В. Мамонова, Е.С. Поворознюк Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия РАСЧЕТЫ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ И ИНТЕГРАЛОВ ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МУЛЬТИСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ $\text{Co}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}/\text{Cu}(100)$	33
10. В.В. Прудников, А.А. Самошилова Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ МУЛЬТИСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ $\text{Co}/\text{Cu}(100)/\text{Co}$ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ НЕРАВНОВЕСНОГО ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ	37
11. Е.А. Рогачев, Е.В. Якутова, М.А. Климовская, М.А. Зверев Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ РЕЗИНОВЫХ ОБРАЗЦОВ МЕТОДАМИ СКЕНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ	42
12. П.А. Рябинкина, Е.Г. Бушуева, И.Н. Градусов, А.А. Никулина Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ С КАРБИДОМ НИОБИЯ, СФОРМИРОВАННЫХ НА СТАЛИ 12Х18Н9Т МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ	46
13. С.Б. Скобелев, А.И. Блесман Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПАР ТРЕНИЯ	50
14. К.А. Скороход, А.Е. Иорх, Д.А. Щербаченко Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ ВАНАДИЕМ МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВА.....	55
15. В.Р. Эдигаров, Б.Ш. Алимбаева, П.С. Перков Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ	59
16. А.С. Ярославская, С.Ю. Галле Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия РАСЧЕТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ ПО ГЛУБИНЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ	62

Секция 2 ФИЗИКА И ОБРАЗОВАНИЕ

1. С.В. Бирюков^{1,2}, М.А. Королёва¹

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННЫМИ ДАТЧИКАМИ КОНЕЧНЫХ
РАЗМЕРОВ67

2. В.О. Борзилов, П.С. Шлотгауэр, П.В. Прудников

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МУЛЬТИСЛОЙНЫХ СТРУКТУР,
ОПИСЫВАЕМЫХ АНИЗОТРОПНОЙ МОДЕЛЬЮ ГЕЙЗЕНБЕРГА71

3. В.М. Гордеев, А.Е. Кунакбаева, Г.В. Никонова

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ОБЗОР АКТУАЛЬНЫХ ТОПОЛОГИЙ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ И
МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА.....75

4. И.В. Иванов

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИТИПОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ80

5. А.А. Кабанов, А.И. Щелканов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА БИОФИЗИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ85

6. А.С. Колмогоров, С.С. Колмогорова, С.В. Бирюков

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ
ГРАДИЕНТОМ НАПРЯЖЕННОСТИ87

7. Д.В. Лазарев, Н.Н. Ковалев¹, А.И. Щелканов¹

АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения», г. Омск, Россия

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОЛЬЖЕНИЯ АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ90

8. Д.В. Лазарев, К.В. Мироненко, С.И. Тюлева, А.И. Щелканов¹

АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения», г. Омск, Россия

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ С
УЗЛАМИ КОРРЕКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ92

9. Д.В. Лазарев, К.В. Мироненко, Ю.А. Фоминых¹, А.И. Щелканов¹

АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения», г. Омск, Россия

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО
ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ94

10. <i>В.В. Лазарев, А.Ф. Шишкина</i> Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕСТОВЫХ ФОРМ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ ПО ФИЗИКЕ	97
11. <i>М.П. Ланкина</i> Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия ДИАГНОСТИКА СФОРМИРОВАННОСТИ КОГНИТИВНЫХ КЛЮЧЕВЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ У СТУДЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ ФИЗИКЕ	100
12. <i>В.Е. Ложников</i> Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ГЕЙЗЕНБЕРГА ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ ВАНГА-ЛАНДАУ	103
13. <i>С.И. Мазур, В.Л. Литневский¹, Р.С. Курманов¹, Г.И. Косенко², Ф.А. Иванюк³</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ¹ Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия ² Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия ³ Институт ядерных исследований, г. Киев, Украина ВЫБОР ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ РАСЧЕТА СЕЧЕНИЯ КАСАНИЯ В РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ	106
14. <i>Д.И. Плотников, И.В. Комаров, Д.А. Поляков, К.И. Никитин</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия РЕГИСТРАЦИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ	110
15. <i>Л.В. Рабчук, С.В. Тучков</i> Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия О ПРОБЛЕМАХ ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ФИЗИКА».....	114
16. <i>В.И. Струнин, Д.Б. Карабаева, Г.Ж. Худайбергенов</i> Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛЕНКАХ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ (AlN).....	117
17. <i>А.А. Татевосян, Е.Г. Андреева</i> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ В МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ И КЛАССИФИКАЦИЯ МАШИН	123
18. <i>С.В. Тучков, Л.В. Рабчук, И.В. Александров</i> Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия О МОДЕРНИЗАЦИИ РАБОЧИХ ПРОГРАММ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ФИЗИКА» В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ФГОС 3+ И КУРС «СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА» В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ.....	126

19. *А.В. Чернышова, А.И. Щелканов*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ВЫБОР ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЫ.....128

20. *А.Ф. Шишкина, Е.В. Трофимова*

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРОБЛЕМ УЧАЩИХСЯ СРЕДНЕГО ЗВЕНА В ОСВОЕНИИ
ДИСЦИПЛИНЫ «ФИЗИКА», ВЫЯВЛЯЕМЫХ НА ОЛИМПИАДАХ131

21. *Е.В. Шлякова, Н.А. Толмачева*

Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва

(Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия

РОЛЬ СИТУАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ
ИНФОРМАЦИОННЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ ВОЕННЫХ ВУЗОВ134