

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІі НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2017. № 1

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2017. № 1

Журнал издается с января 1956 г.

Выходит 4 раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 391 от 18 мая 2009 г.

*Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований, включен в базу данных
Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).*

Главный редактор

Петр Александрович Витязь – Президиум Национальной академии наук Беларуси

Редакционная коллегия

- А. П. Ласковнѣв** – Президиум Национальной академии наук Беларуси (*заместитель главного редактора*)
И. А. Старостина (*ведущий редактор журнала*)
А. В. Белый – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси
В. Г. Залесский – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси
А. Ф. Ильющенко – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии
Л. Г. Красневский – Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси
Е. И. Марукович – Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси
Н. К. Мышкин – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
Национальной академии наук Беларуси
О. Г. Пенязьков – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси

Ю. М. Плескачевский – Президиум Национальной академии наук Беларуси
В. М. Федосюк – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению
М. Л. Хейфец – Президиум Национальной академии наук Беларуси
С. А. Чижик – Президиум Национальной академии наук Беларуси

Редакционный совет

С. Воденичаров – Болгарская академия наук (Республика Болгария)
Ю. Гавлик – Комитет по машиностроению Польской академии наук,
Краковская политехника имени Т. Костюшко (Республика Польша)
Г. Жинтялис – Литовская академия наук (Литовская Республика)
Б. Каталнич – Дунайско-Адриатическая Ассоциация по автоматизации и производству (DAAAM),
Венский технический университет (Австрийская Республика)
В. В. Клубович – Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси
(Республика Беларусь)
А. А. Михалевич – Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси
(Республика Беларусь)
А. Г. Наумовец – Национальная академия наук Украины (Украина)
К. А. Солнцев – Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова (Российская Федерация)
Л. Танович – Белградский университет (Республика Сербия)
Б. М. Хрусталёв – Белорусский национальный технический университет (Республика Беларусь)

Адрес редакции:

ул. Академическая, 1, к. 119, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел.: + 375 17 284-19-19; e-mail: fvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2017. № 1.

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *И. А. Старостина*

Компьютерная вёрстка *Н. И. Кацуба*

Подписано в печать 22.03.2017. Выход в свет 28.03.2017. Формат 60×84^{1/8}. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 78 экз. Заказ 38.

Цена номера: индивидуальная подписка – 10,34 руб., ведомственная подписка – 25,29 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/18 от 02.08.2013. ЛП № 02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск, Республика Беларусь

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука».

Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2017

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES. 2017. No. 1

The Journal has been published since January 1956

Issued four times a year

Founded by the National Academy of Sciences of Belarus

The Journal was registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus
in the State Registry of Mass Media, reg. No. 391

*The Journal is included in the List of Journals for Publication of the results of Dissertation Research
in the Republic of Belarus and in the database of Russian Science Citation Index (RSCI)*

Editor-in-Chief

Pyotr A. Vityaz – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus

Editorial Board

- | | |
|-----------------------------|---|
| A. P. Laskovnyov | – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (<i>Associate Editor-in-Chief</i>) |
| I. A. Starostsina | (<i>lead editor</i>) |
| A. V. Byeli | – Physical-Engineering Institute of the National Academy of Sciences of Belarus |
| V. H. Zalesky | – Physical-Engineering Institute of the National Academy of Sciences of Belarus |
| A. F. Ilyuschenko | – State Scientific and Production Amalgamation of Powder Metallurgy |
| L. G. Krasnevski | – Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences
of Belarus |
| Eu.I. Marukovich | – Institute of Technology of Metals of the National Academy of Sciences of Belarus |
| N. K. Myshkin | – V. A. Biely Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems
of the National Academy of Sciences of Belarus |
| O. G. Penyazkov | – A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy
of Sciences of Belarus |
| Yu. M. Pleskachevsky | – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus |
| V. M. Fedosyuk | – Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy
of Sciences of Belarus |
| M. L. Kheyfets | – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus |
| S. A. Chizhik | – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus |

Editorial Council

- | | |
|------------------------|---|
| S. Vodenicharov | – Bulgarian Academy of Sciences (Republic of Bulgaria) |
| J. Gawlik | – Engineering Sciences Division of Polish Academy of Sciences,
Tadeusz Kosciuszko Cracow University of Technology (Republic of Poland) |
| G. Žintelis | – Lithuanian Academy of Sciences (Republic of Lithuania) |
| B. Katalinic | – DAAAM International Vienna, TU Wien (Republic of Austria) |

- V. V. Klubovich** – Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus (Republic of Belarus)
A. A. Mikhalevich – Institute of Power of the National Academy of Sciences of Belarus (Republic of Belarus)
A. G. Naumovets – National Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine)
K. A. Solntsev – A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy of Sciences (Russian Federation)
L. Tanovich – University of Belgrade (Republic of Serbia)
B. M. Khrustalyov – Belarusian National Technical University (Republic of Belarus)

Address of the Editorial Office:

*1, Akademicheskaya Str., room 119, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Tel.: +375 17 284-19-19; e-mail: fvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series. 2017. No. 1.

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor *I. A. Starostina*

Computer imposition *N. I. Kashuba*

It was sent of the press 22.03.2017. Appearance 28.03.2017. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
Digital press. Printed pages 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 78 copies. Order 38.
Number price: individual subscription – 10,34 byn., departmental subscription – 25,29 byn.

Publisher and printing execution:

Republican Unitary Enterprise "Publishing House "Belaruskaya Navuka".

Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions

No. 1/18 dated August 2, 2013. License for the press No. 02330/455 dated December 30, 2013.

Address: 40, F. Scorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus.

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka".

Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2017

СОДЕРЖАНИЕ**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**

Ласковнѐв А. П., Гарост А. И., Кривоносова Е. В. Использование внешних электрических полей при доводке расплавов в плавильных агрегатах	7
Ильющенко А. Ф., Андрушевич А. А., Дьячкова Л. Н., Калининченкo В. А., Лецко А. И. Модифицирование силуминов нанокompозитными порошками интерметаллид/оксид, полученными МАСВС	18
Волочко А. Т., Марков Г. В., Зеленин В. А., Нарушко Е. О. Экранирующие свойства оптических покрытий, полученных на стеклянных и полимерных материалах.....	25
Авдейчик С. В., Струк В. А., Эйсымонт Е. И. Энергетический критерий выбора дисперсных модификаторов высокомолекулярных матриц	31
Козловский А. Л., Боргеков Д. Б., Здоровец М. В., Архангельски Е., Шумская Е. Е., Канюков Е. Ю. Применение трековых мембран в процессах прямого и обратного осмоса	45
Клубович В. В., Кулак М. М., Хрущѐв Е. В. Разработка технологии изготовления зубопротезных дисков из сплавов золота и исследование их свойств	52
Занковец П. В. Закономерности влияния технологического процесса подготовки и сборки под сварку на формирование бездефектных сварных соединений.....	59

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

Томило В. А., Кочик Е. В., Тарасюк И. А., Кравчук А. С. Оптимизация геометрии плоских пружин с учетом конструктивных особенностей и характера динамического нагружения	70
Акулович Л. М., Ермашкевич Д. Б. Автоматизация раскроя заготовок деталей из профильного металлопроката.....	76
Савенко В. С., Троицкий О. А., Силивонец А. Г. Вклад пондеромоторных факторов в реализацию электропластической деформации	85

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Сальников Л. И., Днепровская Н. М., Рубин И. Е., Сальникова И. Е., Тетерева Н. А. Оценка наведенной активности в облучаемых материалах при использовании отработавшего топлива реактора ВВЭР-1200 в радиационных технологиях и пути ее ослабления.....	92
---	----

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Ерофеенко В. Т. Моделирование воздействия высокочастотной электромагнитной волны на фуллерен.....	103
Артюхина Н. К. Методика параметрического расчета новой композиции зеркального плананастигмата ...	115

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

Железняк В. К., Бураченко И. Б., Рябенко Д. С. Критерии оценки защищенности от утечки речевых сигналов.....	122
--	-----

CONTENTS**MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY**

Laskovnev A.P., Harast A.I., Kryvonosova E.V. Using external electric fields when improving quality of alloys in melt in melting units.....	7
Ilyushchenko A.Ph., Andrushevich A.A., Dyachkova L.N., Kalinichenko V.A., Lecko A.I. Modification of silumins by nanocomposite intermetallic/oxide powders produced by MASHS	18
Volochko A.T., Markov G.V., Zelenin V.A., Narushko E.O. Shielding properties of optical coatings obtained on glass and polymer materials.....	25
Avdejchik S.V., Struk V.A., Eisymont Y.I. Energy criterion of selection of high-molecular matrix dispersed modifiers.....	31
Kozlovskiy A.L., Borgekov K.K., Zdorovets M.V., Arkhangelsky E., Shumskaya A.E., Kaniukov E.Yu. Application of track membranes in processes of direct and reverse osmosis.....	45
Klubovich V.V., Kulak M.M., Khrushchov E.V. Development of manufacturing techniques of dentoprosthetic disks from gold alloys and the research of their properties.....	52
Zankovets P.V. Regularities of weld preparation and fit-up technological process influence on faultless of welded connections formation.....	59

MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

Tomilo V.A., Kochyk Y.V., Kravchuk A.S., Tarasiuk I.A. Optimization of flat spring geometry with considering design features and nature of dynamic loading.....	70
Akulovich L.M., Yermashkevich D.B. Automation of cutting of blanks from profiled rolled metal.....	76
Savenko V.S., Troickij O.A., Silivonec A.G. The contribution of ponderomotive factors in implementation of electroplasticity deformation	85

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

Salnikov L.I., Dneprovskaya N.M., Rubin I.E., Salnikova I.A., Tetereva N.A. Induced activity estimate in irradiated materials when using VVER-1200 spent fuel for radiotechnology and ways of its attenuation.....	92
---	----

RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

Erofeenko V.T. Simulation of the effect of high frequency electromagnetic wave on fullerene.....	103
Artioukhina N.K. Parametrical calculation technique of the new mirror plananastigmat composition.....	115

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

Zheleznyak V.K., Burachenok I.B., Rabenka D.S. Assessment criteria of voice signal leakage protection.....	122
---	-----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

УДК 669.011/012:502.174

Поступила в редакцию 18.11.2016
 Received 18.11.2016

А. П. Ласковнѐв¹, А. И. Гарост², Е. В. Кривоносова²

¹*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

²*Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь*

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ДОВОДКЕ
 РАСПЛАВОВ В ПЛАВИЛЬНЫХ АГРЕГАТАХ**

Предложены перспективные методы регулирования состава сплава при незначительных расходах шлакообразующих добавок. При реализации предлагаемой технологии шлак выполняет в основном защитную и электропроводящую функции, а окислительно-восстановительные процессы регулируются величиной и знаком приложенного потенциала. С использованием метода поляризационных кривых изучена катодная и анодная поляризации алюминиевых сплавов в алундовых и графитовых тиглях. Исследовано поведение компонентов алюминиевых сплавов при внешнем катодном и анодном воздействии на расплав постоянным электрическим полем. При катодной поляризации наблюдается значительное снижение угара Mg в процессе выдержки расплава, в то время как при анодной – происходит, наоборот, увеличение угара в сравнении с плавкой без внешнего электрохимического воздействия. Содержание Fe и Ni при анодной полярности расплава не уменьшается по сравнению с плавкой без электрохимического воздействия, что объясняется пассивацией. Наибольший защитный эффект наблюдается для элементов, которые стоят в конце электрохимического ряда напряжений. Так, медь как при катодной, так и особенно при анодной полярности меньше всего угорает.

Ключевые слова: внепечная обработка, плавка, расплав, шлак, электрод, поляризация, анодный эффект, потенциал, плотность тока.

A.P. Laskovnev¹, A.I. Harast², E.V. Kryvonosova²

¹*Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus*

**USING EXTERNAL ELECTRIC FIELDS WHEN IMPROVING QUALITY OF ALLOYS
 IN MELT IN MELTING UNITS**

Some advanced methods for alloy composition regulation at negligible consumption of slag-forming additives are suggested. When implementing the proposed technology, the slag functions as a protector and electric conductor, and redox processes are determined by the magnitude and the applied potential function. Both cathodic and anodic polarization of aluminum alloys in alundum and graphite crucibles is studied with the curves polarization method. The behavior of components of aluminum alloys is studied under external cathodic and anodic effects of the melt with a constant electric field. During the cathode polarization there is a significant decrease of Mg loss in the aging process of the melt; on the contrary, anodic polarization increases the loss in comparison with the melting without external electrochemical action. The content of Fe and Ni under anodic polarity of the melt is not reduced if it is compared to the melting without electrochemical action due to passivation. The elements at the end of the electrochemical series are mostly protected. Thus, copper is wasted less under the cathodic and, especially, anodic polarization.

Keywords: off-furnace treatment, melting, melt, slag, electrode polarization, anode effect, potential, current density.

Введение. Характерными чертами эффективности развития и инновационности должны одновременно выступать сразу несколько критериев, в том числе снижение издержек на единицу производимой продукции [1]. Признание ведущего места науки в составе факторов роста объек-

тивно приводит к акцентированию их внимания на проблемном поле поиска так называемых прорывных направлений, реализация которых позволит принципиально изменить исследовательский фронт и облик современной науки, сформировать новые векторы ее развития [2].

Сложная ситуация на рынке металлошихты побудила коммерческие и технические службы предприятий, использующих при получении литейных сплавов лом, заняться поиском альтернативных материалов и технологий [3].

Связь «микро-мезо-макро» параметров структуры материалов закладывается при переходе из жидкого состояния в твердое, то есть от самого начала технологического процесса, требует применения новых научных и технологических подходов для создания прорывных высокоэффективных технологий¹.

Новые материалы и технологии, созданные на основе прорывных научных разработок Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси и Белорусского государственного технологического университета, позволяют эффективно извлекать металлы из нетрадиционных видов шихты (пыли железосодержащей, шлама ваграночных газов, шлама железосодержащего, окалины, ржавчины, шлифовочных шламов, чугуновой и стальной стружки, отходов футеровочных материалов, отработанных катализаторов химической и нефтехимической промышленности) при применении нового класса восстановителей (атомарных углерода и водорода) [4–7]. Восстановительная атмосфера образуется за счет пиролиза полимерных техногенных отходов (пластмасс и эластомеров) в расплаве в процессе плавки пакетированных совместно с полимерами металлосодержащих материалов. Такая технология позволяет эффективно перерабатывать тонкодисперсные концентраты, когда атомарные углерод и водород обеспечивают достаточную степень извлечения металлов даже в случае переработки оксидов Ti, Zr, Hf. Традиционно вводимый для этого структурно свободный углерод в виде коксовой и графитной пыли, порошкового древесного угля не создает необходимых условий для восстановления металлов.

Исследование составов и строения металлических и шлаковых расплавов, их влияния на технологию плавки, структуру и качество получаемого продукта является одной из важнейших проблем в металлургии. Воздействие различных факторов (атмосфера плавильного аппарата, состав шлака, наличие вредных примесей и др.) приводит к тому, что в реальных металлургических процессах невозможно полностью достичь прогнозируемого равновесия. Одновременно не всегда удается точно оценить вклад того или иного компонента в общий окислительно-восстановительный процесс в системе металл–шлак–газ (М–Ш–Г). Помимо главной движущей причины металлургического процесса – градиента концентраций, на границе металл–шлак возникают короткозамкнутые микрогальванические элементы, которые также определяют состав получаемого сплава. Однако влияние последнего фактора незначительно вследствие малой электродвижущей силы на границе М–Ш.

Ввиду указанных причин является целесообразным использование внешних электрических полей для доводки расплава непосредственно в плавильном агрегате, придание сплаву необходимых параметров как по химическому составу, так и по физико-механическим свойствам.

Электрохимическая поляризация электродов в электрошлаковых процессах вызывает дополнительное падение напряжения при прохождении тока через границу М–Ш или М–Ш–Г [8, 9]. Она может быть обусловлена замедленностью стадии доставки реагентов к границе раздела фаз или электрохимических актов взаимодействия [10].

Имеется стойкий практический интерес к предлагаемым или уже используемым способам получения металлов и их сплавов электрохимическим разложением их оксидов или оксигалогенидных расплавов. Имеющиеся в литературе данные касаются в основном исследований на платиновых электродах [8] и на углеграфитовых анодах [11–13].

Целью настоящей работы является вольтамперометрическое изучение поведения расплавов на основе алюминия с использованием платиновых и углеграфитовых электродов и эквивалентной смеси хлоридов натрия и калия в качестве флюса. Исследования заключались в выявлении каче-

¹ Гарост А. И., Мазец А. Ф. Способ выплавки чугуна: пат. 15409 Респ. Беларусь : МПК(2006.01) C21C1/00, C21C7/00, C25C7/00; дата публ.: 27.10.2011.

ственных особенностей процесса, определения режимов и рабочих параметров электрохимического воздействия.

Методика эксперимента. Поляризации подвергался алюминиевый сплав следующего химического состава (масс.%): Si – 5,11; Fe – 0,79; Cu – 7,18; Mn – 0,20; Mg – 0,42; Ni – 0,23; Zn – 0,40.

В качестве флюса при плавке алюминиевых сплавов использовали эквимольную смесь солей KCl-NaCl. Принимали во внимание, что в расплавленном состоянии гипотетическая плотность смеси солей не очень сильно отличается от фактической, так как при рабочих температурах гигроскопичность смеси невысока.

При подборе флюса исходили из следующих соображений:

плотность солевой смеси в расплавленном состоянии должна быть не более $2,7 \text{ г/см}^3$, чтобы, по возможности, исключить нежелательное перемешивание расплава и шлака;

соли должны иметь невысокую летучесть;

температура плавления солевого расплава не должна сильно отличаться от температуры плавления алюминия и его сплавов (не более $150 \text{ }^\circ\text{C}$);

солевой расплав не должен взаимодействовать с алюминием (катионы солей должны быть электроотрицательными по сравнению с алюминием);

расплав не должен поглощать влагу из воздуха.

Описание экспериментальной установки. Исследования проводились в температурном интервале $750\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$ в трехэлектродной электрохимической ячейке (рис. 1) в печи муфельного типа. Температура контролировалась с помощью платинородиевой термопары ТПП(S) в пределах $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. В качестве рабочего электрода в алундовом тигле служила платиновая проволока, в графитовом – сам тигель, поверхность контакта которого с расплавом определяла рабочую плотность тока.

Противоэлектрод представлял собой неэкранированный стержень из углерадита диаметром 14 мм, глубина его погружения составляла около 5–10 мм и зависела от количества шлака. Навески солей марки «химически чистые» для солевого расплава (флюса) взвешивали на аналитических весах (масса загружаемого флюса составляла около 1/5 от массы переплавляемого сплава), помещали на расплавленный алюминиевый сплав, выдерживали до полного расплавления смеси. В качестве электрода (квазиэлектрода) сравнения использовали платиновую проволоку диаметром 0,5 мм, которая была отделена от рабочей части ячейки чехлом из алунда. Последний погружался в расплав и имел небольшое отверстие диаметром 2 мм для обеспечения электролитической связи между электродом сравнения и рабочим пространством ячейки. Токотводом и соединительными проводами в электрической цепи служила проволока из нихрома, которая не имела контакта с рабочей средой электролизера, чтобы не внести примесей в исследуемый расплав. Контакт между графитовым тиглем и нихромом выступала предварительно отполированная медная пластина, которая по мере эксплуатации незначительно окислялась и периодически зачищалась.

Исследуемый расплав поляризовали с помощью источника питания Б7-48 при постоянных токовых нагрузках и переменной поляриности расплава кратковременно до установления постоянных показаний вольтметра относительно электрода сравнения (поляризационные измерения) и в гальваностатических условиях в течение 1–1,5 ч.

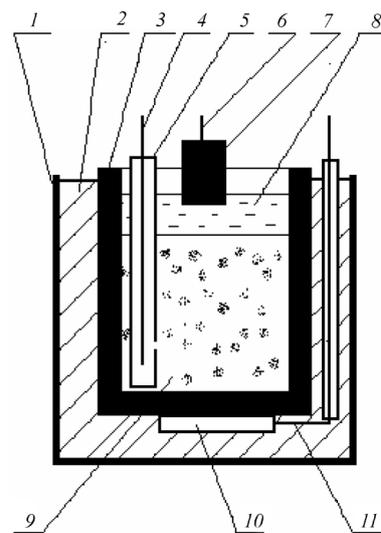


Рис. 1. Схема электрохимической ячейки: 1 – стакан из нержавеющей стали, 2 – асбестовая изоляция, 3 – тигель из углерадита, 4 – платиновый электрод сравнения, 5 – чехол из алунда, 6 – токоподвод, 7 – графитовый противоэлектрод, 8 – шлак, 9 – исследуемый расплав, 10 – медная пластина, 11 – токоподвод

Fig. 1. Scheme of the electrochemical cell: 1 – stainless steel, 2 – asbestos insulation, 3 – carbon graphite crucible, 4 – reference platinum electrode, 5 – alundum bag, 6 – current lead, 7 – graphite counter electrode, 8 – slag, 9 – the investigated melt, 10 – copper plate, 11 – current lead

По окончании работы тигель извлекали из печи, сливали отдельно солевую смесь, а затем – алюминиевый сплав.

Гальваностатические поляризационные исследования. В данной работе сделана попытка оценить электродную поляризацию в системе металл–шлак при указанных потенциалах в гальваностатических условиях с учетом известных закономерностей перехода зарядов через границу фаз [14, 15] и современных представлений об их многостадийности. Величину плотности тока рассчитывали, исходя из поверхности раздела металл–шлак. На снятых $I-E$ -кривых отражены потенциал расплава относительно платинового электрода сравнения и на $I-U$ -кривых – общее падение напряжения на ячейке (рис. 2–5). Потенциал расплава в случае отсутствия электрического поля (стационарный или квазиравновесный) составлял в разных случаях величину, не превышающую 50 мВ относительно платинового электрода сравнения. Это давало возможность предполагать, что соотношение окисленных и восстановленных форм компонентов до внешней поляризации в глубине расплава невелико. Смещение стационарного потенциала по окончании процесса электрохимического воздействия происходило незначительно относительно первоначального значения, что также указывало на отсутствие заметной пассивации расплава при использовании шлака.

При катодной поляризации расплава (рис. 2) в области рабочих значений тока 10–11 mA/cm^2 наблюдается резкое увеличение напряжения на электрохимической ячейке примерно в 2 раза, при этом потенциал катода несколько уменьшается. Стремительный рост напряжения указывает на то, что происходит пассивация анода, то есть растет омическая составляющая при заданных плотностях тока. Данное явление известно при электролизе ионных расплавов с применением угольных или графитовых анодов и носит название «анодный эффект». Возникновению анодного эффекта предшествует установление анодного перенапряжения, растущего до предела, при котором начинается указанный эффект. Между угольным анодом и электролитом наблюдается световая полоса, характеризующаяся желтым свечением и состоящая из массы мельчайших искр. В момент анодного эффекта образование пузырьков газа прекращается. При электролизе расплавленных хлоридов имеет место образование активных комплексов хлора, и даже CCl_4 [16].

Механизм разряда ионов хлора может быть изображен следующим образом:



Основной причиной возникновения анодного эффекта следует считать образование пленки поверхностного соединения углерода с галогеном (C_xCl_y). Когда поверхность покрывается этим

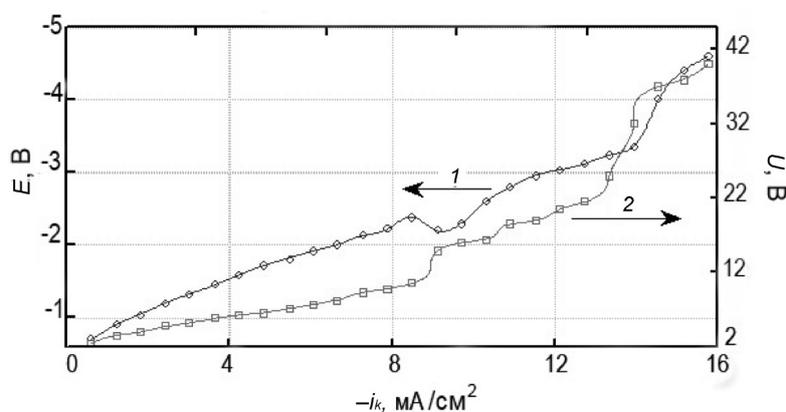


Рис. 2. Катодная поляризация расплава в алундовом тигле (токоподводы платиновые): 1 – потенциал расплава относительно платинового электрода сравнения, 2 – общее падение напряжения на ячейке

Fig. 2. Cathodic polarization of the melt in the alundum crucible (current leads are platinum): 1 – melt potential relating to the platinum reference electrode, 2 – total voltage decrease throughout the cell

соединением, наступает ухудшение смачиваемости электрода. Следует указать еще и на тот факт, что галогениды углерода являются изоляторами. Только одновременное проявление электроизолирующих свойств и плохой смачиваемости электрода может привести к возникновению анодного эффекта. Исследованию вышеуказанного явления посвящены работы [17, 18], но, несмотря на это, природа его окончательно не установлена. Поскольку в основе анодного эффекта лежит появление устойчивой газовой пленки, необходимо указать некоторые аспекты экспериментальных наблюдений:

- увеличение количества газа с ростом плотности тока;
- достаточно интенсивное испарение шлакового расплава;
- плохая смачиваемость углеродистого электрода расплавленным электролитом;
- электростатический эффект, заключающийся в задержке заряженных пузырьков газа на поверхности электрода.

В дальнейшем при более глубокой катодной поляризации расплава (в области потенциалов менее -3 В наблюдается скачок роста напряжения на ячейке до 40 В и выше. При этом на катодной кривой увеличение потенциала соответствует i_k , близкому к предельному. Это может быть связано с началом разряда ионов, стоящих в начале электрохимического ряда напряжений и содержание которых незначительно.

При анодной поляризации расплава (рис. 3) на инертных платиновых электродах повышение напряжения на ячейке пропорционально росту потенциала анода с ростом плотности тока. Однако в области потенциалов $\sim 1,5-3,0$ В наблюдается резкий рост анодного потенциала. Это, в свою очередь, не может быть связано с анодным эффектом жидкого расплава, так как не наблюдается резкого роста напряжения. В данном случае можно лишь предположить, что присутствует диффузионный режим окисления некоторых элементов силумина. Диффузионный режим окисления некоторых расплавов отмечен в работах [19, 20]. К тому же установлены следующие экспериментальные факты [21]:

- возникновение анодного эффекта происходит только на углеродистых анодах, на инертных (платина, золото) и растворимых анодах указанный эффект не наблюдается;

- критическая плотность тока возникновения анодного эффекта зависит от концентрации растворенных окислов, температуры электролита и растет с их увеличением;

- смачиваемость электрода зависит от изменения рабочей поверхности электрода и поверхностного натяжения электролита.

Последнее может меняться в результате электролиза значительно ввиду изменения концентраций компонентов в окисленном и восстановленном состоянии. Доставка ионов в жидких расплавах не может быть замедлена, поэтому дальнейшее увеличение анодного потенциала ведет к возрастанию концентрации ионов, способных разряжаться на границе М–Ш (к примеру Cl^-).

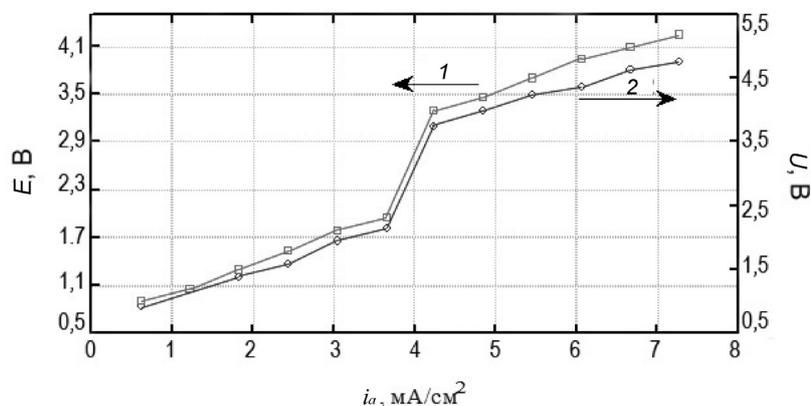


Рис. 3. Анодная поляризация расплава в алундовом тигле (токоподводы платиновые): 1 – потенциал расплава относительно платинового электрода сравнения, 2 – общее падение напряжения на ячейке

Fig. 3. Anodic polarization of the melt in the alundum crucible (current leads are platinum): 1 – melt potential relating to the platinum reference electrode, 2 – total voltage decrease throughout the cell

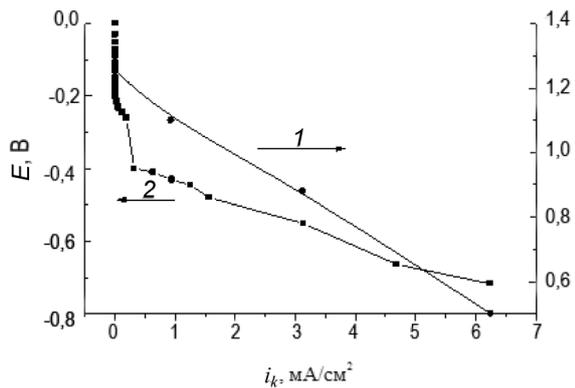


Рис. 4. Катодная поляризация расплава в графитовом тигле: 1 – потенциал расплава относительно платинового электрода сравнения, 2 – общее падение напряжения на ячейке

Fig. 4. Cathodic polarization of the melt in the graphite crucibles: 1 – melt potential relating to the platinum reference electrode, 2 – total voltage decrease throughout the cell

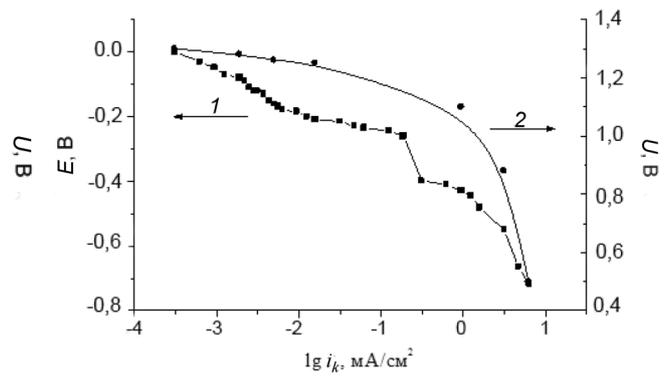


Рис. 5. Катодные кривые в логарифмических координатах: 1 – потенциал расплава относительно платинового электрода сравнения, 2 – общее падение напряжения на ячейке

Fig. 5. Cathodic curves in the logarithmic coordinates: 1 – melt potential relating to the platinum reference electrode, 2 – total voltage decrease throughout the cell

Катодная поляризационная кривая расплава в графитовом тигле (рис. 4) показывает, что в случае использования ячейки, проводящей электрический ток (тигель выполняет роль токоподвода), не наблюдается никаких ограничений по восстановительному процессу в жидком металле. Увеличение токовой нагрузки соответствует плавному росту катодного потенциала. Однако, как видно из кривых, представленных в логарифмических координатах (рис. 5), на зависимости $\lg i_k - E$ наблюдается несколько участков с предельными токами, что указывает на диффузионный характер восстановления некоторых ионов металлов, которые содержатся в расплаве в незначительном количестве (Mg, Mn). Диффузионные явления у электродов в ионных расплавах подчиняются тем же закономерностям, что и в водных растворах, однако благодаря высоким температурам и довольно высоким значениям вязкости коэффициенты диффузии очень часто существенно отличаются по величине.

Электрохимическое перенапряжение в данном случае очень мало, так как токи обмена i_0 для всех металлов велики и составляют 5–33 кА/см² (в водных растворах $i_0 = 10^{-2} - 10^{-6}$ кА/см²). Отклонение потенциала от равновесного невелико и составляет 2–30 мВ.

Следует отметить, что при использовании графитового тигля не наблюдается при указанных плотностях тока и анодного эффекта, так как достигается более равномерное распределение тока

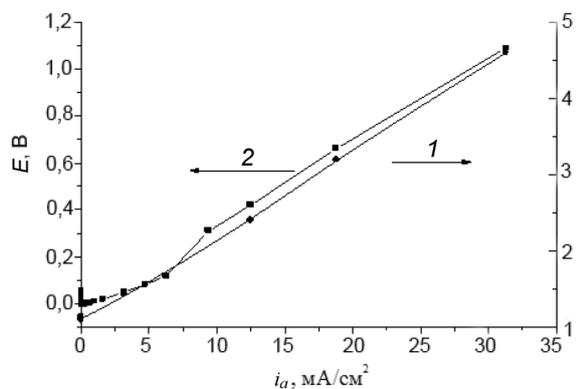


Рис. 6. Анодная поляризация в графитовом тигле: 1 – потенциал расплава относительно платинового электрода сравнения, 2 – общее падение напряжения на ячейке

Fig. 6. Anodic polarization of the melt in the graphite crucibles: 1 – melt potential relating to the platinum reference electrode, 2 – total voltage decrease throughout the cell

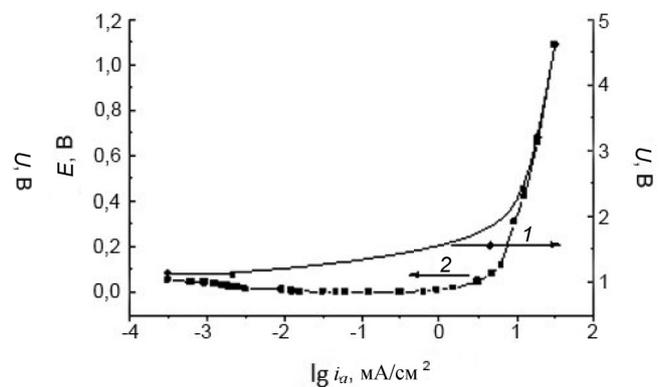


Рис. 7. Анодные кривые в логарифмических координатах: 1 – потенциал расплава относительно платинового электрода сравнения, 2 – общее падение напряжения на ячейке

Fig. 7. Anodic curves in the logarithmic coordinates: 1 – melt potential relating to the platinum reference electrode, 2 – total voltage decrease throughout the cell

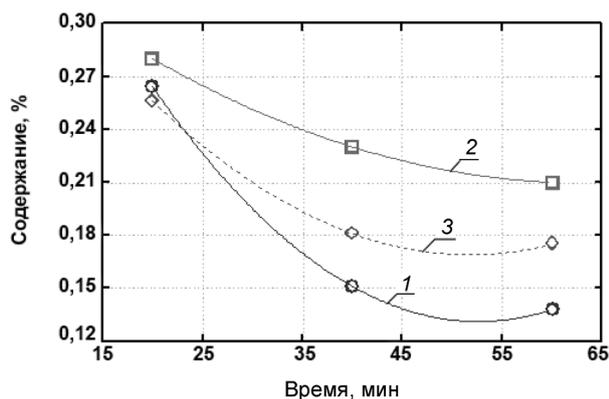


Рис. 8. Изменение содержания магния в расплаве: 1 – анодная поляризация, 2 – катодная поляризация, 3 – поляризация не проводилась

Fig. 8. Magnesium content changes in the melt: 1 – anodic polarization, 2 – cathodic polarization, 3 – no polarization

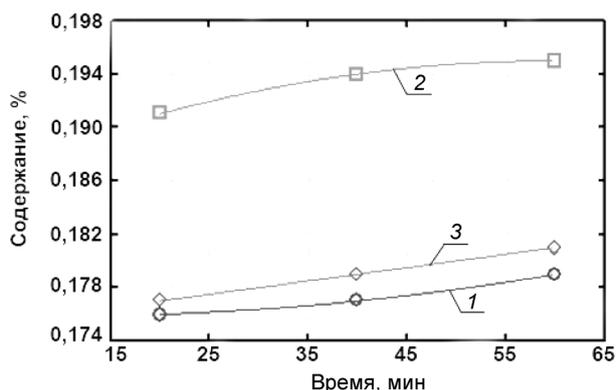


Рис. 9. Изменение содержания марганца в расплаве: 1 – анодная поляризация, 2 – катодная поляризация, 3 – поляризация не проводилась

Fig. 9. Manganese content changes in the melt: 1 – anodic polarization, 2 – cathodic polarization, 3 – no polarization

по всему расплаву и окислительно-восстановительный процесс протекает во всем объеме жидкого металла.

В случае анодной полярности расплава в графитовом тигле (рис. 6, 7) лишь при значительной поляризации (выше 100 mA/cm^2) наблюдается пассивация расплава, то есть возрастают критические значения плотности тока, что позволяет интенсифицировать анодный процесс.

Поведение элементов алюминиевого сплава при внешнем электрохимическом воздействии. С целью изучения влияния природы и полярности внешнего электрохимического воздействия на поведение элементов алюминиевого сплава была произведена длительная выдержка расплава при постоянном рабочем токе $I = 25 \text{ mA}$, или $1,56 \text{ mA/cm}^2$, в расчете на поверхность раздела М–Ш. При такой анодной нагрузке не достигается пассивное состояние расплава. Поляризация производилась отдельно при катодной и анодной полярности расплава в течение 20, 40 и 60 мин. После разливки и охлаждения образцов проводились исследования (рис. 8–14) химического состава (ГОСТ 21132.1).

Характер перераспределения компонентов между расплавом и шлаком в первом приближении связан с их расположением в электрохимическом ряду напряжений.

На положение металла в ряду напряжений влияют ионный состав расплава и температура. В связи с отсутствием единого растворителя, который имеется в случае использования водных растворов, для расплавов невозможно построить единый ряд напряжений металлов. Такие ряды

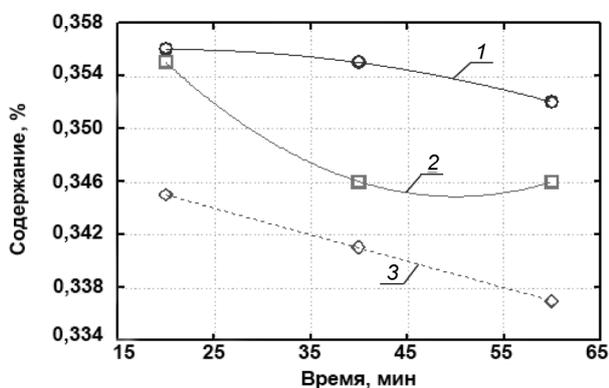


Рис. 10. Изменение содержания цинка в расплаве: 1 – анодная поляризация, 2 – катодная поляризация, 3 – поляризация не проводилась

Fig. 10. Zinc content changes in the melt: 1 – anodic polarization, 2 – cathodic polarization, 3 – no polarization

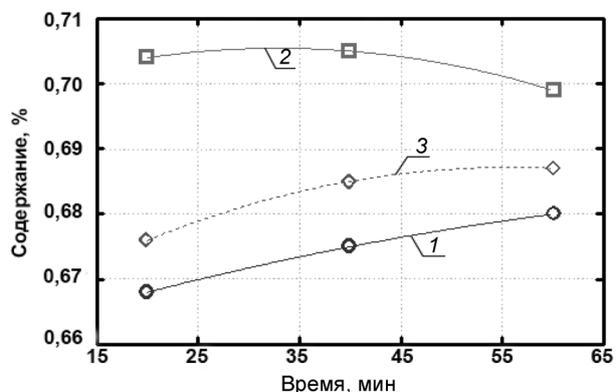


Рис. 11. Изменение содержания железа в расплаве: 1 – анодная поляризация, 2 – катодная поляризация, 3 – поляризация не проводилась

Fig. 11. Iron content changes in the melt: 1 – anodic polarization, 2 – cathodic polarization, 3 – no polarization

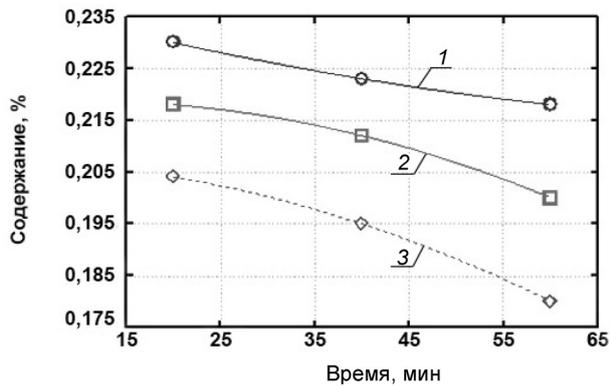


Рис. 12. Изменение содержания никеля в расплаве: 1 – анодная полярзация, 2 – катодная полярзация, 3 – полярзация не проводилась

Fig. 12. Nickel content changes in the melt: 1 – anodic polarization, 2 – cathodic polarization, 3 – no polarization

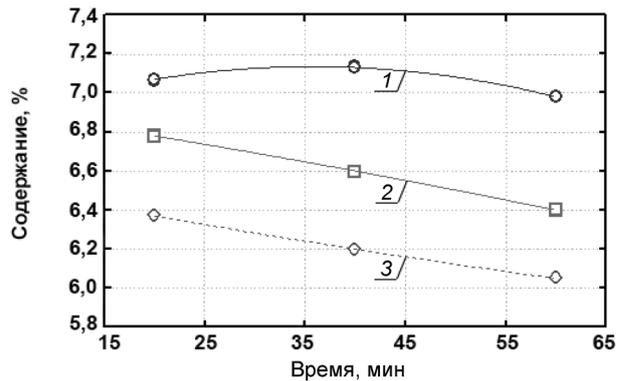


Рис. 13. Изменение содержания меди в расплаве: 1 – анодная полярзация, 2 – катодная полярзация, 3 – полярзация не проводилась

Fig. 13. Copper content changes in the melt: 1 – anodic polarization, 2 – cathodic polarization, 3 – no polarization

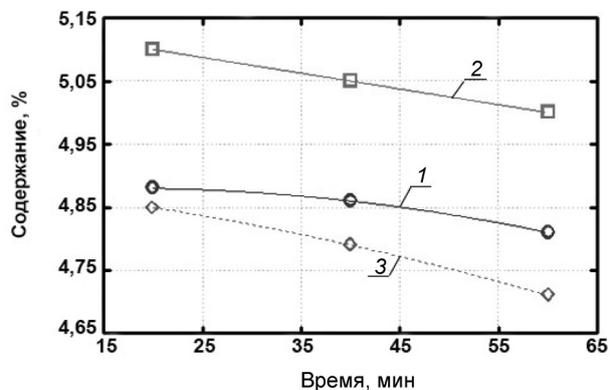


Рис. 14. Изменение содержания кремния в расплаве: 1 – анодная полярзация, 2 – катодная полярзация, 3 – полярзация не проводилась

Fig. 14. Silicon content changes in the melt: 1 – anodic polarization, 2 – cathodic polarization, 3 – no polarization

можно построить для расплавов и для индивидуальных солей металлов, имеющих один общий ион, или для металлов в расплавах определенного ионного состава. При переходе от одного типа анионов к другому и в зависимости от температуры в некоторых случаях изменяется положение металла в ряду напряжений.

Электрохимический ряд металлов для эквимольной смеси NaCl-KCl при температуре 700 °C: Mg, Th, U, Mn, Al, Zr, Ti, Zn, Cr, Fe, Pb, Sn, Co, Cu, Ni, Ag, Pt, Au.

При катодной полярзации (рис. 8) наблюдается значительное снижение угара Mg в процессе выдержки расплава, в то время как при анодной происходит, наоборот, увеличение угара в сравнении с плавкой без внешнего электрохимического воздействия.

Магний как активный металл будет в первую очередь окисляться при анодной обработке. Также следует отметить, что, меняя полярность расплава, можно лишь уменьшить угар Mg, но нельзя полностью его исключить при увеличении продолжительности обработки.

Естественно, что данный ряд может быть использован при анализе поведения компонентов в шлаке, и хотя рассматриваемый расплав имеет другой ионный состав, но в целом положение элементов в ряду практически сохраняется.

Поведение Mn (рис. 9) при изменении полярности алюминиевого расплава, в первом приближении, аналогично поведению Mg. Однако можно заметить, что при катодной полярности Mn можно защитить от угара и при увеличении длительности обработки.

Угар Zn (рис. 10) как при анодной, так и при катодной полярзации меньший, чем в отсутствие электрохимического воздействия, и практически одинаковый.

При анодной полярности расплава содержание Fe (рис. 11), Ni (рис. 12) не уменьшается по сравнению с плавкой без электрохимического воздействия, что объясняется пассивацией.

Наибольший защитный эффект наблюдается для элементов, которые стоят в конце электрохимического ряда напряжений. Так, Cu как при катодной, так и особенно при анодной полярности (рис. 13) меньше всего угорает.

Такие составляющие расплава, как Si (рис. 14), возможно защитить при анодном и при катодном воздействиях на расплав.

Выводы. Новые материалы и технологии, обсуждаемые в представленных материалах, позволяют эффективно извлекать металлы из нетрадиционных видов шихты (пыли железосодержащей, шлама ваграночных газов, шлама железосодержащего, окалины, ржавчины, шлифовочных шламов, чугуновой и стальной стружки, отходов футеровочных материалов, отработанных катализаторов химической и нефтехимической, промышленности) при применении нового класса восстановителей (атомарных углерода и водорода). Восстановительная атмосфера образуется в процессе пиролиза полимерных техногенных отходов (пластмасс и эластомеров) в расплаве в процессе плавки пакетированных совместно с полимерами металлосодержащих материалов.

В представленном исследовании показано, что при воздействии слабыми электрическими полями на систему металл–шлак или металл–шлак–газ можно интенсифицировать окислительно-восстановительные процессы. Определено, что возможно регулирование состава сплава при незначительных расходах шлакообразующих добавок. При реализации предлагаемой технологии шлак будет выполнять в основном защитную и электропроводящую функции, а скорость окислительно-восстановительных процессов регулируется величиной и знаком приложенного потенциала.

С использованием метода поляризационных кривых исследованы катодная и анодная поляризации расплавов в алундовых и графитовых тиглях, влияние электрохимических параметров (плотность тока, природа поляризации) на массообменные процессы и состав получаемого продукта.

Проведена оценка процессов поляризации в системе металл–шлак в гальваностатических условиях с учетом известных закономерностей перехода зарядов через границу фаз и современных представлений об их многостадийности. При катодной поляризации расплава в алундовом тигле в области рабочих значений тока $10\text{--}11\text{ мА/см}^2$ наблюдается резкое увеличение напряжения на электрохимической ячейке примерно в 2 раза, при этом потенциал катода несколько уменьшается. Стремительный рост напряжения указывает на то, что происходит пассивация анода, то есть растет омическая составляющая при заданных плотностях тока.

На катодной поляризационной кривой в токопроводящем графитовом тигле не наблюдается никаких ограничений по восстановительному процессу в жидком металле. Увеличение токовой нагрузки соответствует плавному росту катодного потенциала. При этом присутствует несколько участков с предельными токами, что указывает на диффузионный характер восстановления некоторых ионов металлов, которые содержатся в расплаве в небольшом количестве (Mg, Mn).

Исследовано поведение компонентов алюминиевых сплавов при внешнем катодном и анодном воздействии на расплав постоянным электрическим полем. Характер перераспределения компонентов между расплавом и шлаком в первом приближении связан с их расположением в электрохимическом ряду напряжений. На положение металла в ряду напряжений влияют ионный состав расплава и температура. При катодной поляризации наблюдается значительное снижение угара Mg в процессе выдержки расплава, в то время как при анодной происходит, наоборот, увеличение угара в сравнении с плавкой без внешнего электрохимического воздействия. Магний как активный металл будет в первую очередь окисляться при анодной обработке. Также следует отметить, что, меняя полярность расплава, можно лишь уменьшить угар Mg, но нельзя полностью его исключить при увеличении продолжительности обработки. Поведение Mn при изменении полярности алюминиевого расплава, в первом приближении, аналогично поведению Mg. Однако можно заметить, что при катодной полярности Mn можно защитить от угара и при увеличении длительности обработки. Угар Zn как при анодной, так при катодной поляризации меньший, чем при отсутствии электрохимического воздействия. При анодной полярности расплава содержание Fe и Ni не уменьшается по сравнению с плавкой без электрохимического воздействия, что объясняется пассивацией.

Список использованных источников

1. Короткевич, А. В. Инновационный потенциал Беларуси / А. И. Короткевич, А. В. Козлов, Д. В. Шпарун // Наука и инновации. – 2015. – № 11 (153). – С. 37–42.
2. Гончаров, В. Научные прорывы: проблемы выбора и реализации / В. Гончаров // Наука и инновации. – 2015. – № 1 (143). – С. 43–47.

3. Гарост, А. И. Железоуглеродистые сплавы: структурообразование и свойства / А. И. Гарост. – Минск : Беларуская навука, 2010. – 252 с.
4. Ласковнѣв, А. П. Многофункциональные (износостойкие и антифрикционные) покрытия на изделиях из чугуна / А. П. Ласковнѣв, А. И. Гарост, А. И. Покровский // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 2. – С. 89–94.
5. Ласковнѣв, А. П. Создание литейных материалов из техногенных отходов / А. П. Ласковнѣв, А. И. Гарост // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2015. – № 3. – С. 88–95.
6. Ласковнѣв, А. П. Использование железосодержащих материалов с органическими загрязнителями в качестве шихты при выплавке серых чугунов / А. П. Ласковнѣв, А. И. Гарост // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2016. – № 1. – С. 62–74.
7. Ласковнѣв, А. П. Устойчивость состава и структуры материала к воздействию факторов окружающей среды при создании полиакрилонитрильных охлаждающих сред / А. П. Ласковнѣв, А. И. Гарост, Е. В. Кривоносова // *Навука і тэхніка : міжвуз. зб. / Луцк. нац. тэхн. ун-т. – Луцк, 2015. – Вип. 49. – С. 89–96.*
8. Калмыков, В. А. Влияние термоэлектронных свойств шлаков на межфазные процессы в системе газ – шлак – металл / В. А. Калмыков, П. Я. Агеев // *Изв. вузов. Черн. металлургия*. – 1969. – № 8. – С. 10–13.
9. Патон, Б. Е. Металлургия электрошлакового процесса / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар. – Киев: Наук. думка, 1986. – 247 с.
10. Есин, О. А. Физическая химия пирометаллургических процессов / О. А. Есин, П. В. Гельд. – М.: Металлургия, 1966. – Ч. 2. – 704 с.
11. Grjotheim, K. Aluminium electrolysis / K. Grjotheim, C. Krohn, M. Malinovski. – Dusseldorf: Aluminium Verlag GmbH, 1982. – 630 p.
12. Haupin, W. E. Electrometallurgy of Aluminium / W. E. Haupin, W. B. Frank // *Comprehensive Treatise Electrochemistry*. – N. Y.; London: Plenum Press. – 1981. – Vol. 2. – P. 301–325.
13. Ветюков, М. М. Электрометаллургия алюминия и магния / М. М. Ветюков, А. М. Цыплаков, С. Н. Школьников. – М.: Металлургия, 1987. – 320 с.
14. Есин, О. А. Концентрационная поляризация при высоких температурах / О. А. Есин, Г. А. Топорищев // *Журн. физ. химии*. – 1957. – № 2. – С. 51–54.
15. Скорость ионного обмена между жидким железом и оксидным расплавом / А. А. Плышевский [и др.] // *Электрохимия*. – 1968. – № 3. – С. 304–306.
16. Делимарский, Ю. К. Кинетика электродных процессов в расплавленных солях / Ю. К. Делимарский // *Физическая химия расплавленных солей и шлаков : тр. Всесоюз. совещ. по физ. химии расплавл. солей и шлаков, Свердловск, 22–25 нояб. 1960 г. / Акад. наук СССР, Урал. фил., Ин-т электрохимии ; [отв ред. А.И. Беляев]. – М., 1962. – С. 7–21.*
17. Антипин, Л. Н. Электрохимия расплавленных солей / Л. Н. Антипин, С. Ф. Важенин. – М.: Металлургиздат, 1964. – 365 с.
18. Баймаков, Ю. В. Электролиз расплавленных солей / Ю. В. Баймаков, М. М. Ветюков. – М.: Металлургиздат, 1965. – 560 с.
19. Попель, С. И. Теория металлургических процессов / С. И. Попель, А. И. Сотников, В. Н. Бороненков. – М.: Металлургия, 1986. – 463 с.
20. Взаимодействие расплавленного металла с газом и шлаком / С. И. Попель [и др.]. – Свердловск: УПИ, 1975. – 184 с.
21. Делимарский, Ю. К. Электрохимия ионных расплавов / Ю. К. Делимарский. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.

References

1. Korotkevich A.I., Kozlov A.V., Shparun D.V. Innovation Facilities in the Republic of Belarus. *Nauka i innovatsii* [Science and Innovations], 2015, no. 11 (153), pp. 37–42. (In Russian).
2. Honcharov V. Scientific Breakthrough: Problems of Choice and Implementation. *Nauka i innovatsii* [Science and Innovations], 2015, no. 1 (143), pp. 43–47. (In Russian).
3. Harast A.I. *Carbon Iron Alloys: Structure Formation and Properties*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2010, 252 p. (In Russian).
4. Laskovnev A.P., Harast A.I., Pokrovsky A.I. Multipurpose (wearproof and antifrictional) coverings on products from cast iron. *Lit'e i metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy], 2015, no. 2, pp. 89–94. (In Russian).
5. Laskovnev A.P., Harast A.I. Casting Materials Production from Industrial Wastes. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2015, no. 3, pp. 88–95. (In Russian).
6. Laskovnev A.P., Harast A.I. Use of Iron-containing materials with organic impurities as charge in cast iron melting. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2016, no. 1, pp. 62–74. (In Russian).
7. Laskovnev A.P., Harast A.I., Kryvonosova E.V. Stability of Materials Composition and Structure to Environment Factor When Obtaining Polyacrylonitrile Cooling Media. *Naukovi notatki: mizhvuz. zb.* [Scientific Notes: interuniversity collection]. Lutsk, 2015, vol. 49, pp. 89–96. (In Russian).
8. Kalmykov V.A., Ageev P.Ya. Impact of thermionic properties of slag on interphase processes in the system Gas–Slag–Metal. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 1969, no. 8, pp. 10–13. (In Russian).
9. Paton B.E., Medovar B.I. *Metallurgy of Electroslag Process*. Kiev, Navukova dumka Publ., 1986. 247 p. (In Russian).

10. Esin O.A., Gel'd P.V. *Physical chemistry of pyrometallurgical processes. Part. 2*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1966. 704 p. (In Russian).
11. Grjothheim K., Krohn C., Malinovski M. *Aluminium Electrolysis*. Dusseldorf, Aluminium Verlag GmbH, 1982. 630 p.
12. Haupin W.E., Frank W.B. Electrometallurgy of Aluminium. *Comprehensive Treatise of Electrochemistry*. New York – London, Plenum Press, 1981, vol. 2, pp. 301–325. Doi:10.1007/978-1-4684-3785-0_5
13. Vetyukov M.M., Tsyplakov A.M., Shkol'nikov S.N. *Electrometallurgy of Aluminium and Magnesium*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 320 p. (In Russian).
14. Esin O.A., Toporishchev G.A. Concentration polarization under high temperatures. *Zhurnal fizicheskoi khimii* [Russian Journal of Physical Chemistry], 1957, no. 2, pp. 51–54. (In Russian).
15. Plyshevskii A.A., Sotnikov A.I., Esin O.A., Barmin L.N. Ion exchange rate between liquid iron oxide melt. *Elektrokhimiya* [Russian Journal of Electrochemistry], 1968, no. 3, pp. 304–306. (In Russian).
16. Delimarskii Yu.K. Kinetics of electrode processes in melted salts. *Fizicheskaya khimiya rasplavlennykh solei i shlakov: trudy Vsesoyuznogo soveshchaniya po fizicheskoi khimii rasplavlennykh solei i shlakov*. [Physical Chemistry of melted salts and slags: works of All-Union Conference on Physical Chemistry of molten salts and toxins]. Moscow, 1962, pp. 7–21. (In Russian).
17. Antipin L.N., Vazhenin S.F. *Electrochemistry of Melted Salts*. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1964. 365 p. (In Russian).
18. Baimakov Ju.V., Vetyukov M.M. *Electrolysis of Melted Salts*. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1965. 560 p. (In Russian).
19. Popel' S.I., Sotnikov A.I., Boronenkov V.N. *Theory of Metallurgical Processes*. Moscow, Metallurgija Publ., 1986. 463 p. (In Russian).
20. Popel' S.I., Nikitin Yu.P., Barmin L.A., Boronenkov V.N., Pavlov V.V., Sotnikov A.I., Khlynov V.V., Nemchenko V.P. *Interaction of the Melt Metal, Gas, and Slag*. Sverdlovsk, Ural Polytechnic Institute, 1975. 184 p. (In Russian).
21. Delimarskii Yu.K. *Electrochemistry of Ionic Melts*. Moscow, Metallurgija Publ., 1978. 248 p. (In Russian).

Информация об авторах

Ласковнѳ Александр Петрович – академик НАН Беларуси, доктор технических наук, академик-секретарь Отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси, Президиум Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Гарост Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии металлов, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: garost-51@tut.by

Кривonosова Елена Валерьевна – старший преподаватель кафедры межкультурных коммуникаций и технического перевода, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ekrivonosova@tut.by

Для цитирования

Ласковнѳ, А. П. Использование внешних электрических полей при доводке расплавов в плавильных агрегатах / А. П. Ласковнѳ, А. И. Гарост, Е. В. Кривonosова // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 7–17.

Information about the authors

Laskovnev Aliaxandr Petrovich – Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Belarus, D. Sc. (Engineering), Academician-secretary of the Department of Physical and Technical Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Harast Aliaxandr Ivanavich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Department of Materials and Metals Technology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: garost-51@tut.by

Kryvonosova Elena Valeryevna – Senior Lecturer, Department of Intercultural Communications and Technical Translation, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ekrivonosova@tut.by

For citation

Laskovnev A.P., Harast A.I., Kryvonosova E.V. Using external electric fields when improving quality of alloys in melt in melting units. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no.1, pp. 7–17. (In Russian).

А. Ф. Ильющенко¹, А. А. Андрушевич², Л. Н. Дьячкова¹, В. А. Калиниченко³, А. И. Лецко¹¹*Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*²*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь*³*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь***МОДИФИЦИРОВАНИЕ СИЛУМИНОВ НАНОКОМПОЗИТНЫМИ ПОРОШКАМИ
ИНТЕРМЕТАЛЛИД/ОКСИД, ПОЛУЧЕННЫМИ МАСВС**

Исследован процесс модифицирования силуминов введением в расплав нанодисперсных порошков интерметаллидов NiAl, FeAl и композиционных порошков NiAl / 15 % Al₂O₃ и Si/Al₂O₃, полученных методом механически активированного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (МАСВС), с добавкой 10 % вольфрама или меди для увеличения плотности. Показано, что разработанные составы модификаторов позволяют повысить механические свойства силумина и получить значения, превышающие требуемые по нормативам. Эффективность введения нанокomпозитных МАСВС порошков объясняется их активностью благодаря разрушению оксидной поверхностной пленки и созданию неравновесного состояния в поверхностной области в процессе механоактивации. При введении всех модификаторов, кроме композиционного порошка NiAl / 15 % Al₂O₃, происходит повышение временного сопротивления силумина. Максимальные прочность, пластичность и твердость достигаются при введении МАСВС порошка Si/Al₂O₃ с добавкой вольфрама или меди. Введение модификаторов, содержащих МАСВС порошки, приводит к изменению характера распределения, размеров и количества первичного и эвтектического кремния и к повышению однородности металлической основы силуминов. Применение вольфрама и меди улучшает усвояемость вводимых модифицирующих порошков.

Ключевые слова: силумин, модифицирование, нанокomпозитные порошки, интерметаллид/оксид, МАСВС, структура, прочность, твердость.

A.Ph. Ilyushchenko¹, A.A. Andrushevich², L.N. Dyachkova¹, V.A. Kalinichenko³, A.I. Lecko¹¹*Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*²*Belorussian State Agriculture University, Minsk, Belarus*³*Belorussian National Technical University, Minsk, Belarus***MODIFICATION OF SILUMINS BY NANOCOMPOSITE INTERMETALLIC/OXIDE
POWDERS PRODUCED BY MASHS**

The process of silumin modifying by introducing nanodispersed powders of intermetallics NiAl, FeAl, and composite powders of NiAl / 15% Al₂O₃ and Si / Al₂O₃ obtained by the method of mechanically activated self-propagating high-temperature synthesis (MASHS) with addition of 10% tungsten or copper to increase the density was studied. It is shown that the developed modifier compositions make it possible to increase mechanical properties of silumin and to obtain improved values as compared with standards. The effectiveness of introduction of nanocomposite MASHS powders is explained by their activity due to destruction of the oxide surface film and creation of nonequilibrium state in the surface region during mechanical activation. With the introduction of all modifiers, in addition to the composite powder NiAl / 15 % Al₂O₃, ultimate tensile strength of silumin increases. Maximum strength, ductility and hardness are achieved with insertion of MASHS Si/Al₂O₃ powders and addition of tungsten or copper. The introduction of modifiers containing MASHS powders results in changing in distribution, size and amounts of primary and eutectic silicon and improves homogeneity of silumin metal matrix. The use of tungsten and copper improves assimilability of the introduced modifying powders.

Keywords: silumine, modification, nanocomposite powders, intermetallic/oxide, MASHS, structure, strength, hardness.

Структура и свойства литых металлов во многом определяются режимом кристаллизации, который можно регулировать в относительно широких пределах. Основными методами воздействия на процесс кристаллизации металлов и сплавов с целью улучшения их свойств и качества литых заготовок являются модифицирование и изменение скорости охлаждения. Модифицирование производят для измельчения: макро- и микрoзерна (дендритных ячеек); фазовых составляющих (эвтектик, перитектик, в том числе хрупких и легкоплавких фаз) с изменением их состава.

ва путем введения присадок, образующих с этими фазами химические соединения; первичных кристаллов, выпадающих при кристаллизации, в доэвтектических, эвтектических или заэвтектических сплавах, а также для изменения формы, размера и распределения неметаллических включений (интерметаллидов, карбидов, графита, оксидов, сульфидов, оксисульфидов, нитридов, фосфидов) [1].

Все известные модификаторы по их действию на структуру металлов можно классифицировать на три группы: модификаторы 1-го рода – повышают смачиваемость одной составляющей сплава другой и снижают поверхностное натяжение на границе между ними, что облегчает образование твердой фазы, контактирующей с жидкой фазой; модификаторы 2-го рода – примеси, являющиеся непосредственными зародышами кристаллизации; модификаторы 3-го рода – инокуляторы, изменяющие литую структуру за счет уменьшения перегрева кристаллизующегося металлического расплава путем повышения скорости кристаллизации. Наибольшее применение в силу технологичности, производительности и недефицитности находит примесное модифицирование.

Для повышения эффективности примесного модифицирования наиболее перспективно использование модификаторов с ультрадисперсной микроструктурой [2]. В работе [3] в качестве модификаторов для вторичных алюминиевых сплавов использовали ультрадисперсные порошки карбидов, оксидов, нитридов, боридов, которые вводили в расплав в виде спрессованных таблеток и тщательно перемешивали.

В последнее время для модифицирования литейных сплавов все больше используются наноструктурные порошки (НП) в виде активных химических соединений с размерами образований, не превышающими 500 нм [1, 4]. Важнейшим преимуществом таких модификаторов является большое количество частиц, приходящихся на единицу объема расплава, что в значительной степени определяет эффективность измельчения кристаллической структуры обрабатываемого сплава и, как следствие, значительное повышение прочностных и эксплуатационных свойств материалов.

Для достижения максимального эффекта применения наночастиц актуальным является вопрос рационального их ввода в составы модификаторов. Один из таких способов предусматривает предварительное смешивание порошковых компонентов и их прессование в прутки или брикеты. Однако ни один из вышеупомянутых модификаторов не обладает комплексным действием на алюминиево-кремниевые сплавы (силумины), что не позволяет получать в них высокодисперсную структуру [5].

Ранее проведенные исследования показали перспективность использования ультрадисперсных порошков, полученных методом механически активированного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (МАСВС), для модифицирования алюминиевого литейного сплава АК12 [6]. Эффективность их применения определяется степенью разрушения окисной пленки на поверхности ультрадисперсных порошков при механическом активировании. Механоактивация (обработка в высокоэнергетических мельницах) проводится для инициирования реакции горения, а также для расширения возможности проведения реакций в самораспространяющемся режиме в концентрационных областях, где традиционный самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) не удастся реализовать ни при каких условиях. Кроме того, механоактивация позволяет модифицировать условия протекания химических реакций и существенно изменять термические параметры фронта горения (температуру, скорость горения, скорость разогрева и др.), приводя к изменению структуры и свойств продуктов синтеза [7–11].

Целью данной работы явилось изучение процесса модифицирования силумина АК12 нанокompозитными порошками интерметаллидов и композитов интерметаллид/оксид различного состава, полученными МАСВС.

Методика проведения исследований. Сплавы силумина марки АК12 состава, масс. %: 11 кремния, 0,5 магния, 0,6 марганца, алюминий – остальное – плавил в электрической камерной печи сопротивления с графитовым тиглем. Заливку производили при 760 °С после 10 мин выдержки. НП различного состава вводили из расчета 0,1 % от массы жидкого расплава в виде спрессованных при давлении 300 МПа брикетов диаметром 25 мм.

В качестве модификаторов использовали смеси нанокompозитных порошков интерметаллид/оксид, полученных МАСВС, с измельченным до дисперсности 100–200 мкм порошком сплава АК12. Для увеличения плотности брикетов и получения более равномерного распределения модификаторов в отливке в состав вводили медь или вольфрам.

Применяли модификаторы следующих составов, масс. %:

- 1) 50 % NiAl (30 % Al) + 50 % АК12;
- 2) 50 % Si / Al₂O₃ + 45 % АК12 + 5 % W;
- 3) 50 % FeAl (35 % Al) + 5 % ZrO₂ + 45 % АК12;
- 4) 50 % Si/Al₂O₃ + 40 % АК12 + 10 % Cu;
- 5) 50 % NiAl (30 % Al) + 40% АК12 + 10 % Cu;
- 6) 50 % (NiAl (30 % Al) / 15 % Al₂O₃) + 40 % АК12 + 10 % Cu.

Механоактивацию порошков осуществляли в планетарной шаровой мельнице РМ400МА («Retsch», Германия) в течение 30 мин при скорости вращения ведущего вала 400 мин⁻¹ и соотношении массы шаров к массе обрабатываемого материала 20 : 1. В качестве размольных тел использовали шары из стали ШХ15 (ГОСТ 801-78) диаметром 5 мм (ГОСТ 3722-81). Самораспространяющийся высокотемпературный синтез проводили в экспериментальном реакторе постоянного давления в среде аргона.

Для исследования химического состава, структуры, механических свойств немодифицированного и модифицированного силумина отливались образцы необходимой формы и размеров в песчано-глинистых формах по ГОСТ 2685-93.

Временное сопротивление и относительное удлинение определяли на испытательной машине «Instron» со скоростью нагружения 1 мм/мин. Измерения твердости проводили по Бринеллю на твердомере ТШ-2М.

Микроструктуру сплава исследовали на металлографическом микроскопе МEF-3 при различном увеличении на шлифах, травленных раствором Келлера.

Степень модифицирования сплава оценивали по размеру зерна, равномерности распределения и размеру включений кремния.

Результаты исследований. В процессе получения брикетов модификаторов было установлено, что прессуемость модификатора № 3 очень низкая, брикеты рассыпались, что не дало возможности использовать модификатор при плавке.

Применение вольфрама и меди для увеличения плотности модификаторов оказалось эффективным: брикеты погружались глубоко в расплав и не всплывали на поверхность, что обеспечило лучшую усвояемость модификаторов.

Влияние введения модификаторов на механические свойства силумина приведено в таблице.

Сравнительные результаты исследований химического состава, структуры, механических свойств, структуры силуминов

Effect of modifiers on properties of silumin

№ состава модификатора	Твердость, НВ	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %
–	104	143	6,3
1	101	155	7,1
2	128	163	9,3
4	131	158	5,6
5	104	156	6,4
6	118	144	5,8

Как видно из таблицы, все виды вводимых модификаторов обеспечили механические свойства, превышающие значения, требуемые по ГОСТ 1583-89.

Повышение временного сопротивления отмечается при введении всех модификаторов, кроме состава № 6. Это связано, по-видимому, с отрицательным влиянием оксида алюминия, входяще-

ний первичного кремния (рис. *c*). Временное сопротивление при этом составило 153 МПа, относительное удлинение – 9,3 %, твердость – 128 НВ.

Существенное повышение твердости и прочности отмечается также при введении модификатора № 4, однако пластичность сплава незначительно уменьшилась. Это объясняется, по-видимому, легированием сплава медью, которая изменяет структуру сплава (рис. *d*).

Исследование структуры немодифицированного сплава показало, что она состоит из α -твердого раствора кремния в алюминии, эвтектического кремния (темные иголки длиной 50–70 мкм) и частиц первичного кремния размером 30–50 мкм (рис. *a*). Введение модификаторов приводит к измельчению эвтектических иголок кремния до 20–30 мкм и частиц первичного кремния до 10–20 мкм (рис. *b–e*).

Таким образом, результаты исследований позволяют рекомендовать модификаторы, содержащие нанодисперсные МАСВС порошки для внепечной обработки алюминиево-кремниевых сплавов с целью повышения их механических и эксплуатационных характеристик.

Заключение. Механическое активирование и разрушение оксидной пленки при МАСВС определяет эффективность применения нанокompозитных порошков, полученных таким методом, для модифицирования силуминов. Предложенные составы модификаторов позволяют превысить механические свойства, требуемые по ГОСТ 1583-89. Наиболее высокие свойства достигаются при введении модификаторов, содержащих полученный МАСВС порошок $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$ с добавкой вольфрама или меди для повышения плотности.

Введение модификаторов, содержащих МАСВС порошки, приводит к изменению характера распределения, размеров и количества первичного и эвтектического кремния и к повышению однородности металлической основы силуминов.

Список использованных источников

1. Марукович, Е. И. Модифицирование сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко. – Минск: Беларус. навука, 2009. – 192 с.
2. Седельников, В. В. Структурообразование кристаллизующихся систем при модифицировании их ультрадисперсными порошками / В. В. Седельников // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 1/2. – С. 13–19.
3. Лукьянов, Г. С. Алюминиевые лигатуры с мелкокристаллическим строением / Г. С. Лукьянов, В. М. Никитин // *Литейное производство*. – 1997. – № 8/9. – С. 4–6.
4. Влияние модифицирования ультрадисперсными порошками оксидов тугоплавких металлов и криолита на структуру, механические свойства и разрушение чугуна СЧ25 / А. П. Быкова [и др.] // *Изв. вузов. Черн. металлургия*. – 2014. – Т. 57, № 11. – С. 37–42.
5. Стеценко, В. Ю. Определение механизмов литья алюминиево-кремниевых сплавов с высокодисперсной и инвертированной микроструктурой / В. Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 2. – С. 22–29.
6. Андрушевич, А. А. Модифицирование алюминиевого сплава АК12 наноструктурными материалами / А. А. Андрушевич, Л. Н. Дьячкова, А. И. Лецко // *Материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике»*. – Минск: БНТУ, 2016. – Т. 1. – С. 424–425.
7. Role of mechanical activation in SHS synthesis of TiC / F. Maglia [et al.] // *J. Mater. Sci.* – 2004. – Vol. 39. – P. 5227–5230.
8. Влияние механической активации на параметры безгазового горения и высокотемпературного синтеза в металлических системах / Ю. Г. Найбороденко [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики*. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2002. – С. 90–91.
9. Mechanoactivation of SHS system and Processes / E. A. Levashov [et al.] // *Int. J. SHS*. – 2007. – Vol. 16, N 1. – P. 46–50.
10. Твердофазный режим горения в механоактивированных СВС-системах. I. Влияние продолжительности механической активации на характеристики процесса и состав продуктов горения / М. А. Корчагин [и др.] // *Физика горения и взрыва*. – 2003. – Т. 39, № 1. – С. 51–59.
11. Твердофазный режим горения в механоактивированных СВС-системах. II. Влияние режимов механической активации на характеристики процесса и состав продуктов горения / М. А. Корчагин [и др.] // *Физика горения и взрыва*. – 2003. – Т. 39, № 1. – С. 60–68.

References

1. Marukovich E.I. *Alloys modifying*. Minsk, Belorusskaia Nauka Publ., 2009. 192 p. (In Russian).
2. Sedel'nikov V.V. Structurization crystallizing systems in the modification of ultrafine powders. *Lit'e i metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy], 2005, no. 1/2, pp. 13–19. (In Russian).
3. Luk'yanov G.S., Nikitin V.M. Aluminium master alloys with fine crystalline structure. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry. Technologies and Equipment], 1997, no. 8/9, pp. 4–6. (In Russian).
4. Bykova A.P., Lychagin D.V., Chumaevskii A.V., Kurzina N.A., Novomeiskii M.Yu. Effect of refractory metal oxide and cryolite ultrafine powders modifying on the structure, mechanical properties and fracture iron GI25. *Izvestiya visshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2014, vol. 57, no 11, pp. 37–42. (In Russian).
5. Stetsenko V.Yu. Definition of the casting mechanisms of aluminum-silicon alloys with superfine and inverted microstructure. *Lit'e i metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy], 2013, no. 2, pp. 22–29. (In Russian).
6. Andrushevich A.A., D'yachkova L.N., Letsko A.I. Modification of aluminum alloy AK12 by nanostructured materials. *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike. Materialy 14 mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. T. 1* [Science to education, industry, economics. Proceedings of 14th International Science and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, Belarusian National Technical University, 2016, pp. 424–425. (In Russian).
7. Maglia F., Anselmi-Tamburini U., Deidda C., Delogu F., Cocco G., Munir Z.A. Role of mechanical activation in SHS synthesis of TiC. *Journal of Materials Sciences*, 2004, vol. 39, pp. 5227–5230. Doi: 10.1023/b:jmsc.0000039215.28545.2f
8. Naiborodenko Yu.G., Kasatskii N.G., Lepakova O.K., Kitler V.D. Effect of mechanical activation on the parameters of gasless combustion and high-temperature synthesis in metallic systems. *Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoi mekhaniki* [Fundamental and applied problems of modern mechanics]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2002, pp. 90–91. (In Russian).
9. Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Rogachev A.S., Kochetov N.A. Mechanoactivation of SHS system and Processes. *International Journal Encompasses Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2007, vol. 16, no. 1, pp. 46–50. Doi: 10.3103/s1061386207010062
10. Korchagin M.A., Grigor'eva T.F., Bokhonov B.B., Sharafutdinov M.R., Barinova A.P., Lyakhov N.Z. Solid-State Combustion in Mechanically Activated SHS Systems. I. Effect of Activation Time on Process Parameters and Combustion Product Composition. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2003, vol. 39, no. 1, pp. 43–50. Doi: 10.1023/a:1022145201911
11. Korchagin M.A., Grigor'eva T.F., Bokhonov B.B., Sharafutdinov M.R., Barinova A.P., Lyakhov N.Z. Solid-State Combustion in Mechanically Activated SHS Systems. II. Effect of Mechanical Activation Conditions on Process Parameters and Combustion Product Composition. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2003, vol. 39, no. 1, pp. 51–58. Doi: 10.1023/a:1022197218749

Информация об авторах

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор, Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexil@mailbelpak.by

Андрушевич Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология металлов», Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: andru49@mail.ru

Дьячкова Лариса Николаевна – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dyachkova@tut.by

Калиниченко Владислав Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kvlad@bntu.by

Лецко Андрей Иванович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: letsko@tut.by

Information about the authors

Ilyushchenko Alexandr Phedorovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Director, Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexil@mailbelpak.by

Andrushevich Andrey Alexandrovich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor of the Department, Belorussian State Agriculture University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andru49@mail.ru

Dyachkova Larisa Nikolaevna – D. Sc. (Engineering), Assistant Professor, Head of the Laboratory, Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dyachkova@tut.by

Kalinichenko Vladislav Alexandrovich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Head of the Laboratory, Belorussian National Technical University (65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kvlad@bntu.by

Letsko Andrey Ivanovich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Head of the Laboratory, Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: letsko@tut.by

Для цитирования

Модифицирование силуминов композиционными наноструктурными порошками интерметаллид/оксид, полученными МАСВС / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 18–24.

For citation

Pyushchenko A.Ph., Andrushevich A.A., Dyachkova L.N., Kalinichenko V.A., Lecko A.I. Modification of silumins by nanocomposite intermetallic/oxide powders produced by MASHS. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no.1, pp. 18–24. (In Russian).

А. Т. Волочко, Г. В. Марков, В. А. Зеленин, Е. О. Нарушко*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***ЭКРАНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ
НА СТЕКЛЯННЫХ И ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ**

В данной статье представлены покрытия $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$ (ITO) и $\text{ZrO}_2-\text{Ni}-\text{ZrO}_2-\text{Cu}-\text{Ni}-\text{ZrO}_2$, нанесенные на стеклянные и полимерные подложки. Изучены их экранирующие свойства в оптическом и радиочастотном диапазонах длин волн.

Образцы с покрытиями $120(\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2)$ и $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ имеют хорошие экранирующие свойства (98 % падающего электромагнитного излучения отражается в радиочастотном диапазоне длин волн 0,7...17 ГГц). ITO-покрытие имеет низкое поверхностное электросопротивление 8...9 Ом/кв в сочетании с высоким светопропусканием ($T\sim 90\%$). Однако для достижения таких свойств необходим нагрев ITO-подложки до температур 300...400 °С. Покрытие $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ имеет поверхностное электросопротивление порядка 2...3 Ом/кв и светопропускание около 60 %. Такие значения были достигнуты без нагрева подложки и, как следствие, это покрытие может быть нанесено на нетермостойкий материал, например поликарбонат. Кроме того, так как покрытие $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ многослойное, содержащее слои чистых металлов, с высокими электропроводностью и магнитной проницаемостью и слои ZrO_2 с высокой диэлектрической проницаемостью, то его эффективность экранирования выше, чем у покрытия из сплава ITO. Показано, что покрытия системы $\text{ZrO}_2-\text{Ni}-\text{ZrO}_2-\text{Cu}-\text{Ni}-\text{ZrO}_2$ можно использовать для защиты экрана монитора, так как оно соответствует требованиям к экранам устройств отображения информации.

Ключевые слова: покрытия, экран, электромагнитные излучения, пропускание света, эффективность экранирования.

A.T. Volochko, G.V. Markov, V.A. Zelenin, E.O. Narushko*Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***SHIELDING PROPERTIES OF OPTICAL COATINGS OBTAINED ON GLASS AND POLYMER MATERIALS**

Coatings $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$ (ITO) and $\text{ZrO}_2-\text{Ni}-\text{ZrO}_2-\text{Cu}-\text{Ni}-\text{ZrO}_2$ deposited on glass and polymer substrates, are presented. Their shielding properties in the optical and radio frequency wavelength ranges have been studied.

Samples with coatings $120(\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2)$ and $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ have good shielding properties (98 % of electromagnetic emission is reflected in the range of 0.7...17 GHz). ITO-coating has low surface resistance of 8...9 ohms/square per square in combination with high light transmittance ($T\sim 90\%$). However, in order to achieve these properties one needs to heat the substrate up to 300...400 °C. The coating $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ has surface resistance of 2...3 ohms/square per square and light transmittance of about 60 %. These values have been obtained without heating of the substrate and, as a consequence, this coating may be deposited on temperature-sensitive materials such as polycarbonate. Moreover, since $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ coating is a multilayer coating containing layers of pure metals that have high electric conductivity and magnetic permeability and ZrO_2 layers with high dielectric permeability it has higher shielding effectiveness than ITO alloy coating. It has been demonstrated that $\text{ZrO}_2-\text{Ni}-\text{ZrO}_2-\text{Cu}-\text{Ni}-\text{ZrO}_2$ coatings may be used for protection of display screens since they comply with the requirements of screens of information displays devices.

Keywords: coatings, screen, electromagnetic emission, light transmittance, shielding effectiveness.

Введение. Среди разнообразных изделий электронной техники особое место занимают устройства отображения информации: мониторы, дисплеи, жидкокристаллические индикаторы наручных часов, мобильных телефонов и др. Особенностью этих устройств является то, что, с одной стороны, эксплуатирующий их персонал находится в непосредственной близости (порядка 1 м) от информационных экранов, подвергаясь воздействию электромагнитного излучения (ЭМИ), а с другой – сами эти устройства нуждаются в защите, поскольку посредством направленного ЭМИ можно внести изменения в корректную работу компьютера, а также дистанционно считывать информацию с монитора и детектировать ее. Для защиты от излучений применяют специальные экраны и поглотители. Однако защитить лицевую часть монитора достаточно сложно,

так как оператор должен видеть изображение на экране без искажения цвета и размеров. Одним из вариантов защиты экранов является использование металлической сетки, но при этом появляются волны муара, которые снижают контрастность изображения и утомляют глаза оператора. Ослабить воздействие внешних ЭМИ можно также нанесением на стеклянные экраны оптически прозрачных электропроводящих покрытий. В качестве таких покрытий могут быть использованы пленки $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$ (indium tin oxide, ИТО). Кроме того, возможно использование многослойные покрытия, состоящие из чередующихся тонких (десятки нм) металлических (Ni, Cu, Ag) и оксидных слоев (TiO_2 , SiO_2 , HfO_2 , ZrO_2).

Покрытие системы $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$, формируемое на стекле марки К8 [1], является наиболее востребованным в настоящее время. Оксид индия относится к вырожденным полупроводникам *n*-типа [2] с широкой запрещенной зоной, концентрация электронов в нем доходит до $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. При легировании оксида индия четырехвалентным оловом концентрация свободных носителей заряда возрастает до $\sim 1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. ИТО-покрытие имеет высокое светопропускание (около 90 %) и вместе с тем благодаря высокой электропроводности хорошо защищает объект от ЭМИ.

Для обеспечения высоких экранирующих характеристик в радиочастотном диапазоне в сочетании с высокой прозрачностью – в оптическом была выбрана конструкция, которая представляет собой стеклянное основание с нанесенным на него многослойным покрытием. В результате проведения предварительных расчетов и экспериментов было выяснено, что архитектура покрытия с заданными свойствами должна соответствовать формуле $(\text{Me}-\text{Me}_x\text{O}_y)_n$, то есть представлять собой чередование металлических слоев с диэлектрическими. Металл, его структура и толщина в слое должны быть такими, чтобы обеспечивать максимальное пропускание электромагнитных волн при частотах 385...750 ТГц (видимый свет) и минимальное – для частот 0,7...17 ГГц (УВЧ и СВЧ диапазоны). В соответствии с [3] пропускание *T* металлической пленкой ЭМИ рассчитывается по следующим формулам:

$$T(\omega, \Omega, \omega_\tau) = \frac{1}{\left(1 + \frac{(\Omega + \omega_\tau)^2 - \omega_\tau^2}{\omega^2 + \omega_\tau^2}\right)^{1/2}}, \quad (1)$$

$$\Omega = \pi \omega_p^2 L \sim \frac{N}{m^*}, \quad (2)$$

где ω_τ – частота релаксации заряженной частицы; ω_p – плазменная частота; ω – частота ЭМИ; *L* – толщина металлической пленки; *N* – концентрация носителей заряда; *m** – эффективная масса носителей заряда.

Формула (1) позволяет оптимизировать по критерию пропускания ЭМИ заданной частоты толщину металлического слоя, тип кристаллической решетки выбираемых металлов и их структуру. Так, из (1) следует, что чем больше частота ω ЭМИ, падающего на стеклянный образец с покрытием, тем больше его пропускание (прозрачность), то есть функция *T*(ω) является монотонно возрастающей. Функция *T*(Ω) – монотонно убывающая, то есть при увеличении числа носителей заряда (толщины пленки) составляющая пропускания ЭМИ уменьшается, а увеличивается процент отраженного от металлической пленки излучения [4]. Для повышения пропускания волн оптического диапазона и снижения пропускания волн радиочастотного диапазона, а также для уменьшения доли отражения световых волн поверх металлического слоя целесообразно наносить слой диэлектрика с высоким коэффициентом преломления ($n \geq 2$). Причем оптическая толщина такого просветляющего слоя должна быть кратной $\lambda/4$ для достижения минимального отражения. На основании всего изложенного следует, что толщина металлических слоев (Ni, Cu, Ag, Au) в многослойном покрытии должна быть в пределах 20...40 нм, а толщина диэлектрических (ZrO_2 , SiO_2 , HfO_2 и др.) – 35...100 нм. Учитывая теоретические расчеты и эксплуатационные свойства, такие как адгезия, твердость, износостойкость, коррозионная стойкость, окончательный состав покрытия соответствовал формуле $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$, где цифры соответствуют толщинам слоев в нанометрах. Слои из металлов в покрытии обеспечивают вы-



Рис.1. Прозрачность экранов в видимом диапазоне длин волн:
 $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)/\text{K8}$ (a) и $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2/\text{K8}$ (b)

Fig.1. Screen transmittance in the visible range of wavelengths:
 $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)/\text{K8}$ (a) and $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2/\text{K8}$ (b)

сокую электропроводность последних ($\rho = 2 \dots 3$ Ом/кв) и отражение электромагнитного излучения, слои же диэлектриков поглощают ЭМИ и служат просветляющими для нижележащих слоев металлов в видимом диапазоне длин волн.

Прозрачность экранов из стекла К8 с покрытиями систем $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)/\text{K8}$ и $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2/\text{K8}$ достаточно высока и соответствует требованиям к экранам устройств отображения информации (рис. 1).

Материалы и методы исследования. Тонкие пленки оксида индия, легированного оловом, наносили на стеклянные подложки методом реактивного магнетронного распыления мишени из сплава индия (95 мас.%) и олова (5 мас.%) в атмосфере смеси кислорода и аргона. Предельное остаточное давление в камере после откачки составляло $P = (3 \dots 5) \cdot 10^{-3}$ Па, а рабочее – $P = 6 \cdot 10^{-1}$ Па. Мощность, поддерживаемая на магнетроне, была равна 1 кВт. Толщина ИТО-покрытия составляла 120 нм, время непосредственного распыления мишени $\tau = 4$ мин.

Покрытие многослойной системы $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ наносили электронно-лучевым методом на установке ВУ-1А с одновременным контролем толщины слоев спектрофотометром СФКТ 751 В. Давление остаточных газов было не более $7 \cdot 10^{-3}$ Па, ток пучка электронов – 80...120 мА, энергия электронов в пучке – более 6 кэВ. Суммарная толщина данного 6-слойного покрытия достигала величины 250 нм, время непосредственного нанесения $\tau = 4$ мин.

Перед нанесением тонкопленочных структур все подложки проходили отмывку в чистящем растворе, проточной воде, сушку и протирание техническим спиртом.

Измерение поверхностного электросопротивления осуществлялось четырехзондовым методом. При проведении измерения данным методом многослойных покрытий с диэлектрическим верхним слоем из оксида циркония перед его нанесением контактные площадки закрывали маской. Для определения экранирующих характеристик покрытий был использован панорамный измеритель коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01-18, работающий по принципу раздельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отраженной волн.

Результаты и их обсуждение. Свойства покрытий систем $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$ и $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ представлены в таблице.

Сравнительная характеристика оптически прозрачных покрытий экранирующих ЭМИ
Comparative characteristics of optically transparent coatings EMI shielding

Показатель	$120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$	$90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$
ρ , Ом/кв	10	3
R_1 , %	3...5	3...5
T_1 , %	85	60
\mathcal{E} , дБ	29...37	26...33
Коррозионная стойкость (на воздухе)	3000 ч без изменений	3000 ч без изменений
Адгезия	Хорошая	Хорошая

Примечание: R_1 , T_1 – коэффициенты отражения и пропускания для оптического диапазона длин волн (400...700 нм), \mathcal{E} – эффективность экранирования (0,01...10 м).

Из таблицы видно, что покрытие, состоящее из 95 % оксида индия и 5 % оксида олова, обладает высоким светопропусканием в видимом диапазоне длин волн (85 %). Однако для достижения электросопротивления покрытия порядка 10 Ом/кв и высокого светопропускания необходимо его отжиг при $\tau \sim 350 \dots 400$ °С в вакууме после напыления, а затем выдержка на воздухе в течение нескольких суток. Процесс высокотемпературной обработки оксидной пленки позволяет атомам кислорода, внедренным между узлами кристаллической решетки или расположенным на границах зерен, диффундировать в узлы кристаллической решетки. Образующиеся кислородные вакансии действуют как доноры для электронов, увеличивая их концентрацию [5]. Следовательно, в результате отжига удельное поверхностное сопротивление оксидной пленки уменьшается как за счет увеличения концентрации электронов, так и за счет увеличения их подвижности. Данная операция накладывает ограничения по выбору основания для ИТО-покрытия.

Многослойное покрытие системы $ZrO_2 - Ni - ZrO_2 - Cu - Ni - ZrO_2$ может наноситься на относительно холодные поверхности с температурой около 30...40 °С. В качестве таковых могут использоваться пластины из поликарбоната, ПВХ и других нетермостойких прозрачных материалов.

Об эффективности экранирования электронного объекта от ЭМИ в радиочастотном диапазоне длин волн можно судить по величине коэффициентов отражения $K_{отр}$ и передачи $K_{перед}$. Данные параметры характеризуют долю отраженных и прошедших через экран электромагнитных волн соответственно:

$$K_{отр} = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_0}, \quad (3)$$

$$K_{перед} = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_0}, \quad (4)$$

где P_0 – падающая мощность; P_1 – мощность отраженного от экрана ЭМИ; P_2 – мощность прошедшего ЭМИ через экран.

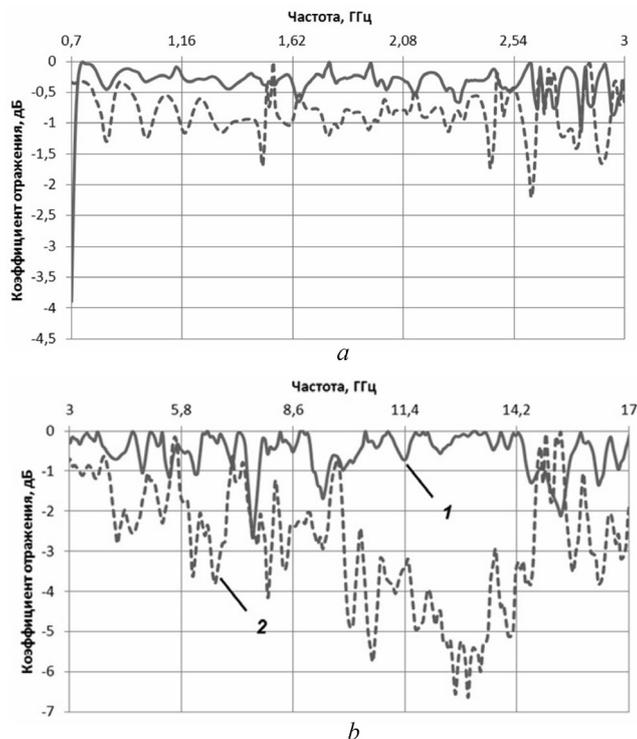


Рис.2. Зависимости коэффициента отражения от частоты ЭМИ в диапазонах 0,7...3,0 ГГц (а) и 3,0...17,0 ГГц (б) для покрытий: 1 – $120(In_2O_3 + SnO_2)$; 2 – $90ZrO_2/8Ni/90ZrO_2/22Cu/5Ni/35ZrO_2$

Fig. 2. Relationships between the reflection coefficient and the EMR frequency within the ranges of 0.7...3.0 GHz (a) and 3.0...17.0 GHz (b) for the coatings: 1 – $120(In_2O_3 + SnO_2)$; 2 – $90ZrO_2/8Ni/90ZrO_2/22Cu/5Ni/35ZrO_2$

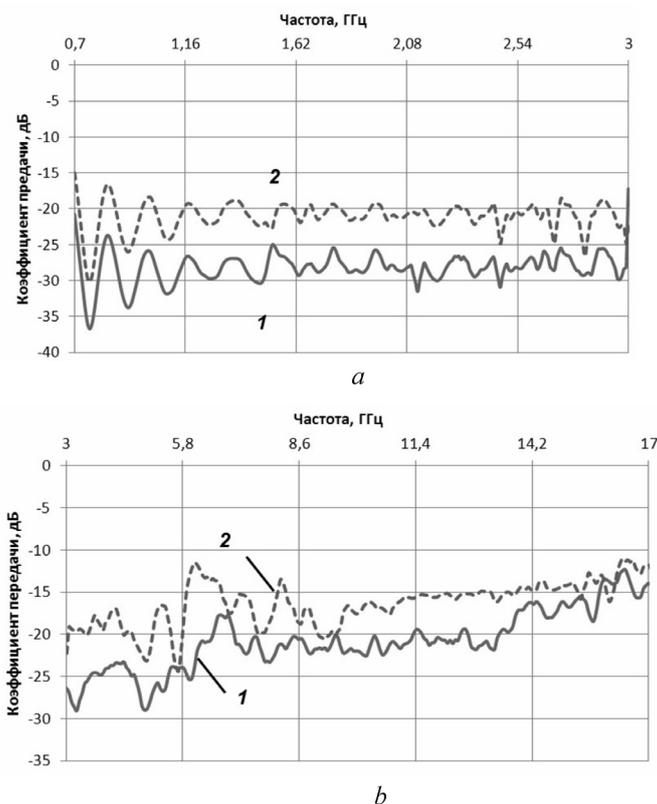


Рис. 3. Зависимости коэффициента передачи от частоты ЭМИ в диапазонах 0,7...3,0 ГГц (а) и 3,0...17,0 ГГц (б): 1 – $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$; 2 – $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$
 Fig. 3. Relationships between the transmission coefficient and the EMR frequency within the ranges of 0.7...3.0 GHz (a) and 3.0...17.0 GHz (b): 1 – $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$; 2 – $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$

Из (3) видно, что при $K_{\text{отр}} = 0$ уровень отраженной мощности ЭМИ соответствует уровню падающей ($P_1 = P_2$), что соответствует полному отражению. По мере уменьшения $K_{\text{отр}}$, уменьшается и часть отраженного ЭМИ. Аналогично в (4): по мере приближения $K_{\text{перед}}$ к нулю растет доля прошедших электромагнитных волн через экран, то есть меньшее их количество будет задержано материалом экранирующего «щита».

Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи исследуемых покрытий представлены на рис. 2 и 3.

Из рис. 2, 3 видно, что из рассмотренных в данной статье систем более эффективное экранирование ЭМИ присуще покрытию системы $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$. Так, коэффициент отражения составляет 0...–2,5 дБ, коэффициент передачи равен –26...–27 дБ в диапазоне 0,7...5,0 ГГц и –20...–15 дБ в диапазоне 6...17 ГГц. Однако многослойное покрытие $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ ненамного уступает первому: в диапазоне частот 0,7...6,0 ГГц значения коэффициента отражения для данных материалов находятся на уровне –0,7...–1,5 дБ, в диапазоне 6...17 ГГц опускаются до –6,5 дБ; а коэффициента передачи –22 дБ в диапазоне 0,7...5 ГГц, –20...–13 дБ в диапазоне 5...17 ГГц.

Закключение. Установлено, что эффективность экранирования ЭМИ радиочастотного диапазона покрытия многослойной системы $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ практически не уступает широко применяемым прозрачным покрытиям ИТО. Однако 6-слойное покрытие обладает более низким электросопротивлением ($\rho \sim 2$ Ом/кв), не требует нагрева подложки до температур порядка 300...400 °С, а только лишь не более 40 °С, что делает возможным осаждение его на прозрачные полимерные материалы. В качестве недостатка предложенной конструкции экрана можно назвать значение светопропускания, которое ниже покрытия $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$ на 20 %, но вместе с тем является достаточным для защиты монитора компьютера, существенно не снижая качество формируемого на нем изображения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Оптически прозрачные электромагнитные экраны / А. Т. Волочко [и др.] // Доклады БГУИР. – 2015. – №3 (89). – С. 53–57.
2. Шапиро, Д. Н. Основы теории электромагнитного экранирования / Д. Н. Шапиро. – Л.: Энергия, 1975. – 112 с.
3. Курбацкий, В. П. О размерной и частотной зависимости параметров модели Друде для ультратонких металлических пленок / В. П. Курбацкий // Журн. техн. физики. – 2015. – Т. 85, вып. 5. – С. 106–109.
4. Проводящие и отражающие тонких металлических пленок / И. В. Антоненц [и др.] // Журн. техн. физики. – 2004. – Т. 74, вып. 11. – С. 102–106.
5. Dawar, A. L. Semiconducting crystal display transparent thin films, their properties / A. L. Dawar, J. C. Joshi // J. Mater. Sci. – 1984. – Vol. 19, N 1. – P. 1–23.

References

1. Volochko A.T., Zelenin V.A., Markov G.V., Narushko E.O. Optically transparent electromagnetic screens. *Doklady BGUIR*, 2015, no. 3 (89), pp. 53–57. (In Russian).
2. Shapiro D.N. *Basics of electromagnetic shielding theory*. Leningrad, Energiya Publ., 1975, 112 p. (In Russian).
3. Kurbatsky V.P. On the size and frequency dependences of the parameters of the Drude model for ultrathin metal films. *Technical Physics*, 2015, vol. 66, no. 5, pp. 736–739. Doi: 10.1134/s1063784215050102
4. Antonets I.V., Kotov L.N., Nekipelov S.V., Karpushov E.N. Conducting and reflecting properties of thin metal films. *Technical Physics*, 2004, vol. 49, no. 11, pp. 1496–1500. Doi: 10.1134/1.1826197
5. Dawar A.L., Joshi J.C. Semiconducting crystal display transparent thin films, their properties. *Journal of Materials Science*, 1984, vol. 19, no. 1, pp. 1–23. Doi: 10.1007/bf00552989

Сведения об авторах

Волочко Александр Тихонович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volochkoat@mail.ru

Марков Геннадий Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь).

Зеленин Виктор Алексеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь).

Нарушко Елена Олеговна – младший научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lena-narushko@mail.ru

Для цитирования

Использование внешних электрических полей при доводке расплавов в плавильных агрегатах / А. Т. Волочко [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 25–30.

Information about the authors

Volochko Alexander Tihonovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Department Head, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volochkoat@mail.ru

Markov Gennady Vasilevich – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus).

ZeleninVictor Alexeyevich – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus).

Narushko Elena Olegovna – Junior Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lena-narushko@mail.ru

For citation

Volochko A.T., Markov G.V., Zelenin V.A., Narushko E.O. Shielding properties of optical coatings obtained on glass and polymer materials. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no.1, pp. 25–30. (In Russian)

С. В. Авдейчик¹, В. А. Струк², Е. И. Эйсымонт²¹ООО «Молдер», Гродно, Беларусь²Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ВЫБОРА ДИСПЕРСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ
ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ МАТРИЦ**

Проведен анализ факторов, влияющих на эффективность модифицирующего действия дисперсных частиц различного состава, строения и технологии получения в высокомолекулярных матрицах (полимерных, олигомерных и смесевых). Показано, что выбор модификатора целесообразно осуществлять по совокупности критериев, среди которых определяющее значение имеет активность модифицирования на различных уровнях структурной организации.

Рассмотрены физические предпосылки проявления активности дисперсных частиц в процессах модифицирования высокомолекулярных матриц. Показано существование нелинейной функции $S(r) = f(r)$, определяющей зависимость параметров характеристик физических свойств частицы от ее геометрических параметров r . Показана целесообразность использования в качестве модификаторов дисперсных частиц микронного диапазона с развитой морфологией поверхностного слоя, обеспечивающего особое энергетическое состояние. Предложено оценивать параметры морфологии поверхностного слоя дисперсной частицы по критерию L_0 , определяемому из выражения $L_0 = 230 \cdot \theta_D^{-1/2}$, где θ_D – температура Дебая. Разработаны методологические подходы оптимального выбора эффективных модификаторов при создании функциональных композитов.

Показана целесообразность использования для оценки энергетического состояния дисперсных частиц метода спектроскопии термостимулированных токов (ТСТ). На основании спектра ТСТ возможно установление температурного диапазона проявления активного модифицирующего действия частицы модификатора, что позволяет осуществлять обоснованный вид технологического воздействия и его параметров при получении композиционного материала и его переработке в изделие с заданными параметрами эксплуатационных характеристик.

Приведены примеры практических приложений разработанных подходов.

Ключевые слова: дисперсность, энергетический фактор, наносостояние, композиционный материал.

S.V. Avdejchik¹, V.A. Struk², Y.I. Eisymont²¹LLC “Molder”, Grodno, Belarus²Yanka Kupala State University, Grodno, Belarus**ENERGY CRITERION OF SELECTION OF HIGH-MOLECULAR MATRIX DISPERSED MODIFIERS**

The factors influencing effectiveness of modifying action of dispersed particles of different composition, structure and technology in producing high molecular matrix (polymer, oligomer and mixed) were analyzed. It is shown that the selection of the modifier is advisable to carry out on set criteria, including modifying activity at different levels of structural organization, which has a decisive importance.

Physical prerequisites of dispersed particles activity occurrence in the processes of modifying of high-molecular matrix are considered. The existence of a non-linear function $S(r) = f(r)$ defining the parameters of the characteristics of physical properties of particle from its geometrical parameters r is shown. The expediency of use of dispersed particles with developed morphology of their surface layer, which provides a special energy state, as modifiers, is shown. It is proposed to estimate the morphology parameters of the surface layer of dispersed particles of the L_0 criteria to be determined from the expression $L_0 = 230 \cdot \theta_D^{-1/2}$ where θ_D – Debye temperature. Methodological approaches to the optimal choice of effective modifiers while creating functional composites are developed.

The usefulness of the method of thermally stimulated current spectroscopy (TSC) for evaluating the energy state of dispersed particles is shown. Based on the current spectrum it is possible to set the temperature range of occurrence of active modifying action of the modifier particle that allows carrying reasonable kind of the technological impact and its parameters in the preparation of a composite material and its processing into a product with specified operating characteristics.

Examples of practical applications of the developed approaches are made.

Keywords: dispersibility, energy factor, nanostate, composite material.

Введение. В широкой номенклатуре машиностроительных материалов особое место занимают композиционные материалы различного функционального назначения, которые получены модифицированием матричных полимерных, олигомерных и совмещенных связующих целевыми компонентами на основе кремний-, углерод-, металлсодержащих соединений с заданной дисперсностью и формой [1–22].

Действующая в материаловедении полимерных композитов на основе промышленно выпускаемых термопластов парадигма базируется на трех основных подходах управления параметрами структуры:

а) на надмолекулярном уровне путем введения в матричные связующие модификаторов, обеспечивающих преобладающий механизм формирования надмолекулярной структуры заданного типа и геометрических параметров, или использования специальных видов термической обработки изделий, полуфабрикатов или функциональных конструкций [8, 12];

б) на межфазном уровне путем введения в полимерную, олигомерную и смесевую матрицу армирующих компонентов преимущественно волокнистого типа с заданной длиной фрагментов [1–7, 10–22];

в) на межмолекулярном уровне путем формирования трехмерной сшитой структуры под действием высокоэнергетических излучений [19].

Не рассматривая особенности механизмов модифицирующего действия дисперсных частиц различного состава, строения и дисперсности, отметим распространенные критерии их обоснованного выбора:

- 1) распространенность, доступность и стоимость исходных полуфабрикатов;
- 2) технологичность процесса диспергирования при получении стабильного выхода оптимальной размерной фракции;
- 3) технологичность совмещения дисперсных частиц с матричным связующим;
- 4) необходимая активность в процессах модифицирования на молекулярном, надмолекулярном и межфазном уровнях;
- 5) технологическое время релаксации активного состояния;
- 6) экологичность производства и безопасность применения в традиционной технологии композиционных материалов;
- 7) возможность безопасного рециклинга технологически обоснованных отходов производства и амортизированных изделий из композиционных материалов.

Реализация всей совокупности отмеченных критериев в модификаторе конкретного состава для определенного типа композиционного материала, как правило, является труднодостижимой задачей, решение которой зависит от многочисленных факторов, прежде всего от установившихся методологических подходов в региональной или национальной промышленности, обусловленных материальным, кадровым, технологическим, организационным обеспечением действующих производств.

Однако во всех случаях использования модификаторов высокомолекулярных матриц основополагающим критерием их обоснованного выбора является заданная эффективность действия, обуславливающая необходимый технически значимый эффект повышения параметров деформационно-прочностных, триботехнических, теплофизических, адгезионных и других служебных характеристик при минимальных экономических затратах, учитывающих материало-, энергоемкость и кадровое обеспечение процессов производства и целевого потребления.

Очевидным является условие выполнения этого критерия, предполагающее достижение оптимального структурного состояния на заданном уровне организации композиционного материала при конкретном сочетании матричного связующего, вида модификатора и технологии их совмещения и переработки.

Анализ литературных источников, посвященных материаловедению и технологии композиционных материалов на основе высокомолекулярных матриц [1–22], свидетельствует об отсутствии единых методологических подходов к выбору функциональных модификаторов при создании композита конкретного функционального назначения.

В большинстве случаев реализуется традиционный трудоемкий подход, основанный на использовании результатов экспериментальных исследований по определению механизмов модифицирующего действия компонентов различного состава, строения, дисперсности и технологии получения. Практическая реализация этого подхода не только затратна, но и, как правило, не обеспечивает достижения оптимального технического эффекта. Более того, в ряде случаев формируются условия проявления «структурного парадокса», сущность которого состоит в неадекватном изменении параметров служебных характеристик композиционных материалов даже при использовании высокоэффективных, в том числе высокопрочных и термостойких, компонентов. Пример проявления подобного структурного парадокса приведен в [23].

Очевидной является необходимость разработки критериев обоснованного выбора компонентов при создании функционального материала, предполагающих учет наиболее общих признаков, свойственных всем типам конденсированных сред, которые формируют физическую парадигму современного материаловедения.

Цель настоящей работы состояла в анализе возможности оценки эффективности модификаторов в высокомолекулярных матрицах по критериям энергетического состояния.

Материалы и методы исследований. В качестве связующих для получения композитов использовали термопластичные полимеры – полиамид 6 (ПА 6), полиамид 11 (ПА 11), полиэтилен низкого давления (ПЭНД), полипропилен (ПП), политетрафторэтилен (ПТФЭ) в состоянии промышленной поставки (ОАО «Гродно Азот», ОАО «Полимир», ОАО «Могилевхимволокно»). Отдельные эксперименты проводили с регенерированными термопластами (ПЭНД, ПП, ПЭВД), полученными на ОАО «Белвторполимер» в соответствии с действующей нормативной документацией.

Для управления параметрами энергетического состояния и дисперсности компонентов использовали технологические приемы, основанные на механическом диспергировании, механохимическом совмещении, воздействии энергетических потоков при термообработке, воздействии коронного разряда, СВЧ-излучения, лазерного излучения с использованием оригинальных установок криогенного диспергирования, вальцевания со сдвигом (УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы»), установки планетарного смешивания АГО-2 (Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН), установки для обработки СВЧ-излучением, лазера КВАНТ-15, высокоэнергетического измельчителя – дисмембратора, установок для нанесения электростатических покрытий (ОАО «Гродненский механический завод», ОАО «Белкард», ОАО «Лакокраска», ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси»). Выбор типа энергетического воздействия и режимов для осуществления процесса активации был обусловлен составом, структурно-химическими и размерными параметрами компонентов, функциональным назначением покрытий или изделий.

Для получения композиционных материалов применяли высокодисперсные, в том числе наноразмерные, частицы углеродсодержащих (УДА, УДАГ, нанотрубки, коллоидный графит, ТРГ), кремнийсодержащих (слюды, глины, кремень, шунгит, трепел), фторсодержащих (УПТФЭ) и металлсодержащих (оксиды Fe, Cu, Zn) **соединений, полученных по оригинальным технологиям** производителя (ЗАО «Синта», ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси», Институт химии Дальневосточного отделения РАН) или в результате специальных технологических воздействий на полуфабрикат (механохимического диспергирования, сублимации).

Физико-химические процессы на границе раздела фаз «матрица-наполнитель», «покрытие-субстрат» при получении, переработке композитов и покрытий и эксплуатации изделий оценивали с использованием ИК-спектроскопии (Tensor-27), рентгеновской дифрактометрии (ДРОН 2,0, ДРОН 3,0), дифференциального термического анализа (Thermoscan-2) по общепринятым методикам. Морфологические параметры частиц и субстратов, подвергнутых различным видам энергетического воздействия, изучали с применением атомно-силового (NT-206), растрового электронного (Mira, Tescan), оптического (MDS) микроскопов. **Энергетическое состояние дис-**

персных частиц, образцов композитов, покрытий и субстратов исследовали методом термостимулированных токов (ТСТ-анализа) на оригинальной установке (ОДО «Микротестмашины»).

Результаты и обсуждение. Анализ литературных источников, посвященных материаловедению и технологии полимерных композитов [1–23], свидетельствует о перспективности использования модификаторов, находящихся в наноразмерном диапазоне, так называемых наноразмерных частиц различного состава, строения и технологии получения. При наличии большого числа исследований, посвященных механизмам модифицирующего действия наночастиц в полимерных, олигомерных и совмещенных матрицах, необходимо подчеркнуть неоднозначность полученных результатов и отсутствие единых представлений, определяющих размерные и концентрационные диапазоны оптимального эффективного действия дисперсных частиц в матричных связующих, различающихся по молекулярной массе, химическому строению макромолекулы, особенностям структурной организации при воздействии технологических факторов – температуры, давления, времени экспозиции и др. Наиболее эффективными многоцелевыми модификаторами оказались природные соединения кремния – цеолиты [21, 22], высокодисперсные продукты детонационного [14, 18], термогазодинамического и плазмохимического [20, 23] синтеза – нанокерамики, сиалоны, наноалмазы (УДА), алмазосодержащая шихта (УДАГ), нанокерамики, фуллерены, нанотрубки, термически расщепленный графит, слюды, глины, а также наноразмерные частицы металлов и оксидов, полученные термолизом металлсодержащих прекурсоров в расплавах термопластов [25]. При этом установлен ряд особенностей модифицирующего действия наноразмерных частиц различного состава, строения и технологии получения, которые определяют эффективность применения. Эти особенности могут быть систематизированы по следующим характерным признакам:

1) увеличение степени дисперсности нелинейно влияет на энергетическое состояние частиц и эффективность их модифицирующего действия [24];

2) с увеличением степени дисперсности увеличивается склонность частиц к образованию кластерных структур различного строения [21];

3) активность модифицирующего действия нелинейно зависит не только от состава, строения и технологии получения высокодисперсных частиц, но и внешних, в том числе технологических, факторов, действующих на компоненты в процессе их получения, хранения, изготовления и переработки композиционных материалов [24];

4) увеличение степени дисперсности частиц приводит к нелинейности экономических затрат на их получение, хранение и практическое использование;

5) высокодисперсные частицы модификаторов высокомолекулярных матриц, как правило, обуславливают необходимость разработки специальных технологий и оборудования для их практического применения [15, 20, 22];

6) высокодисперсные (в том числе наноразмерные) частицы оказывают негативное воздействие на окружающую среду и требуют особых мероприятий по соблюдению безопасных условий их производства и применения [26];

7) долговременные (продолгованные) эффекты действия высокодисперсных (в том числе наноразмерных) частиц на механизмы и кинетику протекания физико-химических (в частности биохимических) процессов изучены не в полной мере [24, 26];

8) эффективность модифицирующего действия высокодисперсных (в том числе наноразмерных) частиц в ряде случаев неадекватна прогнозам вследствие технологических трудностей реализации оптимальных (расчетных) условий межфазных взаимодействий на различных уровнях структурной организации композиционного материала [14–24].

Отличительные особенности практического применения наноразмерных модификаторов свидетельствуют о необходимости системного анализа механизма их действия, который позволит установить наиболее характерные признаки их эффективного действия и условия для их проявления в практической технологии полимерных нанокомпозитов.

Для установления этих общих характерных признаков проведены исследования особенностей морфологии дисперсных частиц различного состава, строения и технологии получения,

нашедшие широкое применение в практическом материаловедении. С использованием растрового электронного и атомно-силового микроскопов установлено, что независимо от индивидуальных особенностей дисперсных частиц им характерны склонность к агломерированию и образованию кластерных структур различного строения и наличие у частиц микроразмерного диапазона компонентов, которые относятся к наноразмерным. Такие наноразмерные компоненты имеют пластинчатый (рис. 1, *b*; 2, *b*; 3, *b*), сферический (рис. 1, *d*; 2, *f*; 3, *d-f*), игольчатый (вискерный) (рис. 1, *f*) габитусы.

Наличие таких наноразмерных компонентов в структуре дисперсных частиц обуславливает проявление ими характерного энергетического состояния поверхностного слоя, которое вызывает структурирование окружающих макромолекул связующего с образованием квазикристаллической структуры [14, 15, 24]. Экспериментальным подтверждением особого энергетического состояния поверхностного слоя дисперсных частиц являются данные спектроскопии термостимулированных токов (ТСТ) (рис. 4). Независимо от индивидуальных признаков дисперсных частиц (состава, строения, дисперсности, технологии получения) наблюдаются характерные температурные диапазоны, в которых отмечено движение носителей заряда различной природы. Другими словами, у всех дисперсных частиц, независимо от их индивидуального состава, строения и технологии получения, определен вклад в механизмы и кинетику формирования гра-

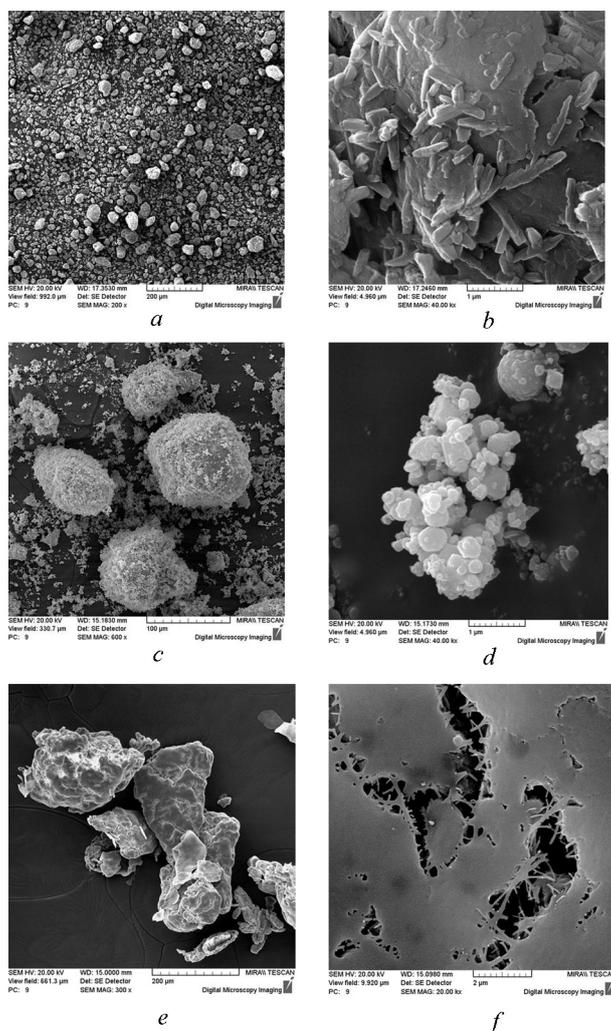


Рис. 1. Характерная морфология дисперсных частиц глин (*a*, *b*), оксидов металлов (*c*, *d*), политетрафторэтилена (*e*, *f*). Увеличение указано на снимках

Fig. 1. A typical morphology of dispersed particles of clay (*a*, *b*), metal oxides (*c*, *d*), polytetrafluoroethylene (*e*, *f*). The magnification is shown on the pictures

ничного слоя в композиционном материале вносит энергетическое состояние, обусловленное наличием наноразмерных фрагментов в поверхностном слое частицы.

Этот вклад зависит не только от индивидуальных особенностей частиц – состава, строения, технологии получения, но и от технологических параметров обработки. Например, термическая обработка дисперсных частиц природных модификаторов кремня и шунгита в диапазоне температур 100–800 °С неоднозначно влияет на их энергетическое состояние, оцениваемое по величине максимального значения ТСТ (рис. 5). Наблюдаемые эффекты увеличения и снижения значения параметра I в зависимости от температуры обработки обусловлены протеканием физико-химических процессов, изменяющих исходное строение, состав частиц, – дегидратации, дегидроксиляции, окисления, термоокислительной деструкции и др. [2, 14–18].

Характерные особенности структуры и строения исследованных частиц обуславливают различные направления управления их активностью путем использования технологических операций заданного назначения. Например, для слоистых минералов типа глины, слюды эффективным является предварительная обработка компонентами, способными проникать в межслоевое пространство и разрушать исходную структуру частиц с образованием наноразмерных пластинок [16]. В результате при воздействии технологических факторов переработки композиционного материала с интеркалированными частицами наполнителя происходит перколяция макромолекул связующего в межслоевое пространство с образованием армированной наноструктуры с повышенными параметрами деформационно-прочностных характеристик [15, 16].

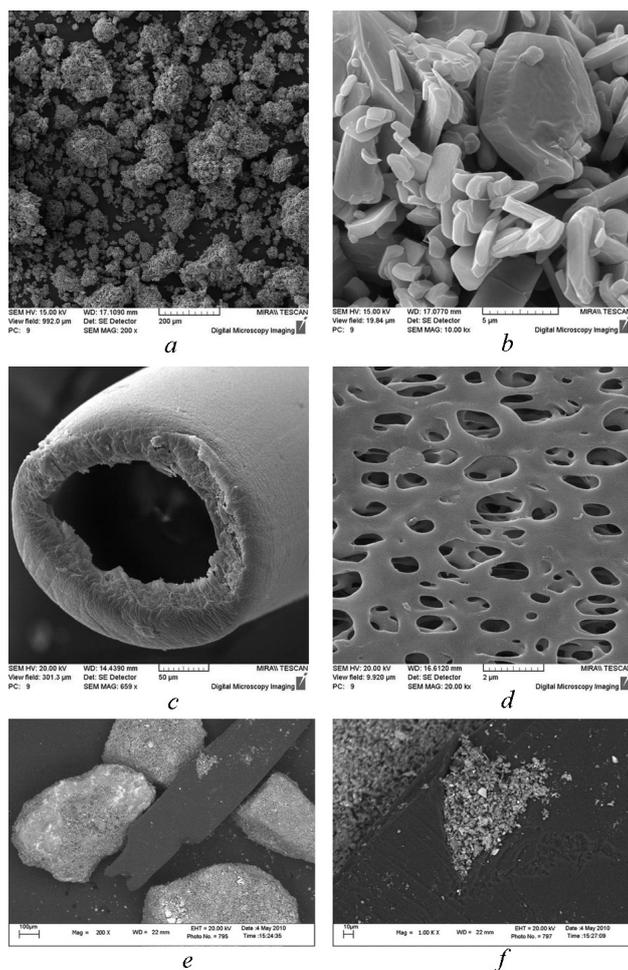


Рис. 2. Характерная морфология частиц формиата меди (*a, b*), полисульфоновых волокон (*c, d*), шунгита (*e, f*). Увеличение указано на снимках

Fig. 2. A typical morphology of particles of copper formiate (*a, b*), polysulfone fibers (*c, d*), shungite (*e, f*). The magnification is shown on the pictures

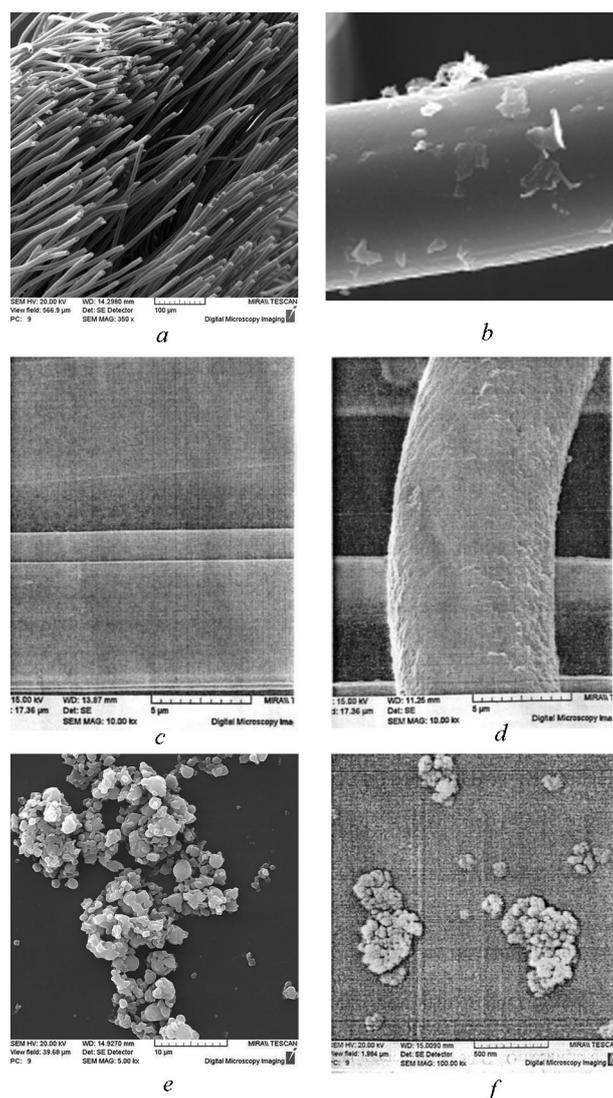


Рис. 3. Характерная морфология углеродных волокон исходных (*a*, *c*, *d*) и обработанных ультрадисперсными частицами политетрафторэтилена (*b*), частиц ультрадисперсного политетрафторэтилена (*e*), ультрадисперсных алмазов (*f*). Увеличение указано на снимках

Fig. 3. A typical morphology of initial carbon fibers (*a*, *c*, *d*), and treated with ultrafine particles of polytetrafluoroethylene (*b*), particles of ultrafine polytetrafluoroethylene (*e*), ultrafine diamonds (*f*). The magnification is shown on the pictures

При использовании в качестве модификаторов металлсодержащих прекурсоров типа солей муравьиной кислоты (формиатов) необходимо учитывать особенности морфологии исходных частиц, которые способствуют формированию в процессе термолитза не единичных частиц металлов (Cu, Fe, Ni, Co), а их кластерных образований, оказывающих комплекс воздействий на структуру нанокompозита [2, 14].

Особое значение при создании высокопрочных нанокompозитов имеют морфология и энергетическое состояние поверхностного слоя высокопрочных армирующих наполнителей – фрагментов волокон заданного состава и размера [4, 27, 28].

При использовании углеродных волокон (УВ), несмотря на наличие характерного нанорельефа (см. рис. 3, *d*), не удается обеспечить необходимый уровень межфазного взаимодействия в композитах на основе термопластичных и сшивающихся матриц. Поэтому в ряде случаев введение в полимерную матрицу (например, ПТФЭ) высокопрочного углеродного наполнителя (УВ) приводит к проявлению структурного парадокса [21, 23, 28]. Эффективным направлением повышения эффективности модифицирующего действия углеродных нановолокон является модифи-

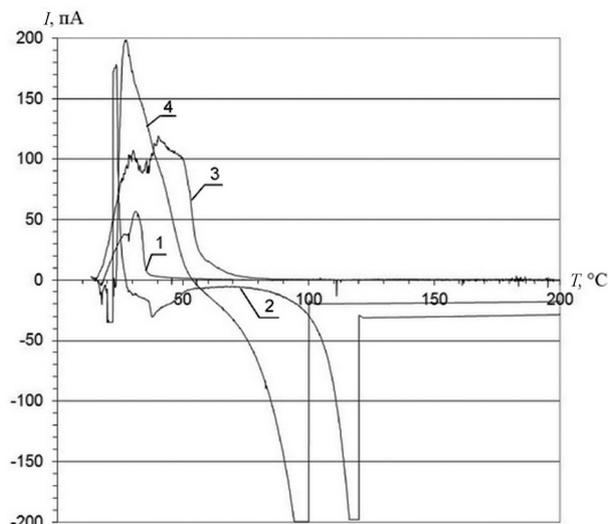


Рис. 4. Спектры термостимулированных токов дисперсных частиц кремня (1), шунгита (2), трепела (3), углеродных нанотрубок (4). Дисперсность частиц – 100–200 мкм
Fig. 4. The spectra of thermally stimulated currents of disperse particles of flint (1), schungite (2), tripoli (3), carbon nanotubes (4). Particles size was 100–200 microns

и энергетического состояния поверхностного слоя, определяющих механизмы и кинетику межфазных процессов в композиционных материалах различного функционального назначения.

Очевидно, что выбор технологии активации дисперсных частиц модификаторов представляет собой многофакторную задачу, включающую не только материаловедческие, но и экономические и экологические аспекты. Особый интерес представляют технологии, сочетающие несколько механизмов модифицирования поверхностного слоя дисперсных частиц, обеспечивая одновременное влияние как механического (благодаря эффекту затекания связующего в микро-нанорельеф поверхностного слоя), так и адсорбционного (благодаря интенсификации физико-химических процессов межфазных взаимодействий) и структурного (благодаря формированию особой структуры граничного слоя) факторов на механизм и кинетику межфазных процессов в композиционных материалах. При этом эти факторы могут проявиться на разных стадиях технологического процесса – при подготовке компонентов, их смешении, при переработке композита в изделия, при специальной модифицирующей обработке изделия для придания ему особых параметров служебных характеристик.

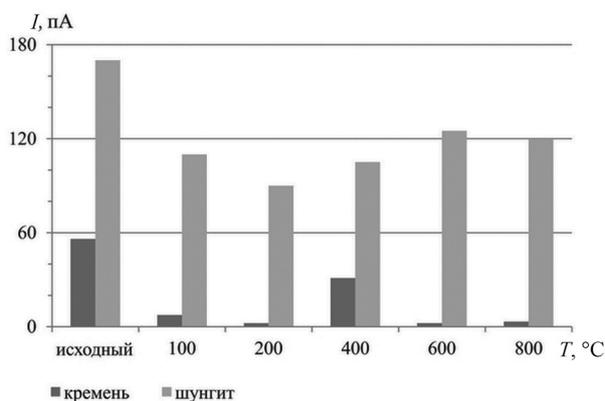


Рис. 5. Зависимость величины максимального термостимулированного тока I_{\max} от температуры обработки дисперсных частиц: кремня, шунгита. Дисперсность частиц – 50–100 мкм

Fig. 5. The dependence of maximum thermally stimulated current I_{\max} on the treatment temperature of dispersed particles of flint and schungite. Particles size was 50–100 microns

цирование их поверхностного слоя с применением фторсодержащих соединений, например частиц ПТФЭ. Механохимическая обработка УВ частицами УПТФЭ способствует формированию специфической структуры граничного слоя (см. рис. 3, *b*), которая повышает совместимость наполнителя с матрицей ПТФЭ [28].

Специфический нанорельеф армирующей частицы может быть сформирован и путем введения в состав полимерной матрицы порообразователей. Например, структура волокон полисульфона с порообразователем содержит фрагменты нано- и микроразмерного диапазона, которые способствуют проникновению матричного связующего и увеличению доли механической составляющей адгезионного взаимодействия на границе раздела [4, 9, 12].

Таким образом, управляя технологическими факторами при получении дисперсных частиц и направленном модифицировании, возможна реализация особой морфологии

и энергетического состояния поверхностного слоя, определяющих механизмы и кинетику межфазных процессов в композиционных материалах различного функционального назначения.

Для обоснованного выбора состава, размеров модифицирующей частицы с размерами в микродиапазоне значений необходимо не только оценить энергетическую активность по параметру максимального значения ТСТ в определенном диапазоне температур, соответствующих технологическим режимам изготовления и переработки композита, но и оптимизировать технологические режимы создания нанорельефа поверхностного слоя, который обеспечит формирование граничного слоя с реализованными механической и адсорбционной составляющими адгезионной прочности. Оценку размерного параметра морфоло-

гии поверхности L_0 , обеспечивающего необходимую активность модифицирующего действия частицы, целесообразно осуществлять с использованием выражения $L_0 = 230 \cdot \theta_D^{-1/2}$, где θ_D – температура Дебая для образца материала полуфабриката, из которого получена модифицирующая частица.

Экспериментальные исследования, осуществленные с компонентами различного состава, строения и технологии получения, свидетельствуют об адекватности размерного параметра L_0 , полученного с использованием предложенного аналитического выражения, литературным данным [23–26].

К числу особо перспективных направлений целевого модифицирования компонентов относится их механохимическая активация при заданных условиях энергетического воздействия [1, 2, 19–34]. Благодаря воздействию механических напряжений определенной интенсивности обеспечивается не только формирование активных центров поверхностных слоев матричного и модифицирующего компонентов, но и их взаимодействие с образованием совмещенного продукта граничного слоя оптимальной структуры.

Проведенные исследования позволили предложить эффективные подходы к оптимальному выбору дисперсных частиц модификаторов высокомолекулярных матриц.

1. Целесообразно использование высокодисперсных частиц преимущественно микронного диапазона с развитой морфологией поверхностного слоя, образованной наноразмерными компонентами различного состава и строения.

2. Соотношение геометрических параметров компонентов поверхностного слоя и объема высокодисперсной частицы должно определяться с использованием физических критериев, характеризующих наносостояние выбранных материальных объектов (матрицы и модификатора).

3. Для обеспечения эффективного модифицирующего действия высокодисперсной частице необходимо придание особого энергетического состояния, обусловленного совокупным действием структурно-химических, размерных и технологических факторов. Выбор превалирующего фактора определяется совокупностью эксплуатационных, энергетических, экономических, экологических параметров, обуславливающих эффективное и целесообразное промышленное применение в соответствии с техническим заданием.

4. При выборе метода активации высокодисперсных частиц, обеспечивающего оптимальное модифицирование, необходимо установление превалирующего механизма формирования переходного (граничного) слоя заданного строения и параметров деформационно-прочностных и адгезионных характеристик и безусловной реализации принципа «разумной достаточности» применительно к конкретному сочетанию материаловедческих, экологических и экономических факторов.

5. Наибольшую перспективу при создании функциональных композиционных материалов и их многотоннажного производства на основе высокомолекулярных матриц имеют дисперсные частицы, полученные на основе природных соединений слоистого, каркасного, цепочечного строения и волокнистых природных, синтетических и искусственных полуфабрикатов с использованием традиционных и специальных технологий, обеспечивающих образование морфологии поверхностного слоя с наноразмерными компонентами с оптимальным уровнем энергетической активности.

6. Для получения композитов на основе высоковязких и высокоплавких матриц предпочтительно применение технологий совместного механохимического активирования компонентов и многоуровневого модифицирования с использованием частиц различного состава, строения и дисперсности.

Практическое апробирование предложенных методологических подходов было осуществлено при создании композиционных материалов на основе термопластичных матриц и пластичных смазок для тяжело нагруженных узлов трения машин, механизмов и технологического оборудования, применяемых на предприятиях машиностроения, строительной индустрии, химической и горнодобывающей промышленности.

Для разработки композиционных материалов для нанесения триботехнических покрытий использовали первичные и регенерированные полимерные термопластичные матрицы, выпускаемые многотоннажно, в том числе отечественными производителями, – ПА 6, ПЭНД, ПП. Модифицирование матричных полимеров функциональными компонентами (трепел, кремний, каолин, УПТФЭ, ПЭНД) осуществляли методом механохимического активирования (МА) с последующим измельчением при криогенных температурах ($-198\text{ }^{\circ}\text{C}$). Покрытия формировали методом псевдооживленного слоя с применением оригинальных установок ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси». Сравнительные исследования свидетельствуют о том, что разработанные составы не только не уступают импортному аналогу ПА 11 («Rilsan», Франция), но и существенно его превосходят по износостойкости. При этом созданные на основе отечественного полиамида 6 (ОАО «Гродно Азот») составы композиционных материалов имеют стоимость в 3–5 раз ниже, чем импортный аналог. Составы композитов с механоактивированными компонентами прошли успешные испытания в конструкциях карданных валов грузовых автомобилей, токарных патронов, производимых на ОАО «Белкард» и ОАО «БелТАПАЗ».

Разработаны составы и технология многослойных покрытий на основе твердых и высокотвердых подложек, формируемых осаждением из активной газовой фазы. Для оптимизации параметров деформационно-прочностных характеристик подслоев из алмазоподобного углерода (АПП) и соединений титана (TiCN , TiAlN) предложена обработка сверхвысокочастотным излучением (СВЧ) с длиной волны $\lambda = 12,25\text{ см}$, частотой 2450 МГц. На подслои с повышенными параметрами твердости наносили методом окунания и натирания (ротационный метод) слои фторсодержащих олигомеров («Фолеокс») и полимер-олигомерных продуктов термогазодинамического синтеза (УПТФЭ). Композиционные многослойные покрытия с активированными подложками на основе АПП, TiCN , TiAlN эффективны для применения в качестве противоизносных и антиразгарных в конструкциях узлов трения прецизионной технологической оснастки (токарных патронов) и литевых форм для изготовления изделий из цветных металлов, выпускаемых на ПУЧП «Цветлит». Разработаны составы многослойных композиционных покрытий на основе соединений титана (TiN , TiCN , TiAlN) и фторсодержащих олигомеров для нанесения на металлообрабатывающий инструмент (сверла, метчики, фрезы, протяжки и др.), применяемый при производстве автокомпонентов, токарных патронов и горнодобывающего оборудования на ОАО «Белкард», ОАО «БелТАПАЗ», ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством».

Установленные особенности изменения энергетического состояния полимерных частиц и субстратов, подвергнутых различным видам технологических воздействий (термическому, механохимическому, лазерному), позволили разработать рекомендации для их использования в качестве компонентов биологически активных добавок и бактерицидных элементов изделий медицинского назначения.

При использовании технологии МА получены слоистые композиты, в которых природный силикат (гальк) выступает в роли носителя, а биологически активный компонент в виде органических кислот и солей (янтарная кислота, сукцинат натрия, сукцинат хитозана, стеарат натрия и др.) имеют химически связанную с носителем форму. Составы МА компонентов могут быть использованы при получении лекарственных препаратов и биологически активных добавок многофункционального действия экологически чистым способом.

Активность дисперсных частиц, подвергнутых энергетическим воздействиям, проявляющаяся в развитой морфологии поверхностного слоя и наличии нескомпенсированного заряда с большим временем релаксации, позволила разработать эффективные составы смазочных масел и пластичных смазок для тяжело нагруженных узлов трения на основе промышленных продуктов (МС-20, И-5, ЦИАТИМ-201, Литол-24, Итмол). При введении высокодисперсных частиц, активированных термическим, лазерным или механохимическим воздействием, в смазочном составе формируются зарядовые кластеры, способствующие повышению нагрузочной способности и тепловой устойчивости разделительных слоев в зоне фрикционного контакта. Разработаны

составы смазочных масел, гидравлических жидкостей и пластичных смазок для применения в конструкциях автокомпонентов (тормозных камер, карданных валов) и токарных патронов для металлообрабатывающего оборудования. Введение в базовый состав наноразмерных продуктов, полученных лазерной или термической абляцией ПТФЭ в сочетании с активированными силикатсодержащими частицами (SiO_2 , кремний), позволяет стабилизировать вязкость амортизирующей жидкости на основе минеральных масел в диапазоне температур 25–80 °С, увеличивает стойкость к заеданию узла привода токарного патрона в 1,5–2,0 раза и ресурс игольчатого подшипника крестовины карданного вала грузовых автомобилей МАЗ, БелАЗ, КАМАЗ. Разработанные составы прошли апробирование на ведущих предприятиях Гродненского региона (ОАО «Белкард», ОАО «БелТАПАЗ») и рекомендованы к внедрению.

Выводы. Рассмотрены особенности выбора дисперсных модификаторов высокомолекулярных матриц при создании композиционных материалов заданного функционального назначения. Показана роль энергетического состояния, обусловленного особенностями состава, кристаллохимического строения и морфологии поверхностного слоя дисперсных частиц, применяемых в качестве модификаторов, в достижении необходимого технически значимого эффекта.

Предложены методологические подходы к процессу выбора компонентов и функциональных материалов и методов их активации, основанные на обеспечении преобладающего механизма протекания межфазных взаимодействий и формирования граничного слоя оптимальной структуры.

Рассмотрены практические приложения разработанных методологических подходов при создании композиционных материалов для изготовления изделий, применяемых в машиностроении, строительной индустрии и горнодобывающей промышленности.

Список использованных источников

1. Гольдаде, В. А. Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем / В. А. Гольдаде, В. А. Струк, С. С. Песецкий. – М.: Химия, 1993. – 240 с.
2. Струк, В. А. Трибохимическая концепция создания антифрикционных материалов на основе многотоннажно выпускаемых полимерных связующих : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01 / В. А. Струк. – Гомель, 1988. – 240 с.
3. Гуль, В. Е. Структура и механические свойства полимеров / В. Е. Гуль, В. Н. Кулезнев. – М.: Высш. шк., 1979. – 352 с.
4. Бабаевский, П. Г. Пластики конструкционного назначения (реактопласты) / П. Г. Бабаевский, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин ; под ред. Е. Б. Тростянской. – М.: Химия, 1974. – 304 с.
5. Сперлинг, Л. Взаимопроникающие полимерные сетки и аналогичные материалы / Л. Сперлинг. – М.: Мир, 1984. – 327 с.
6. Гуль, В. Е. Структура и прочность полимеров / В. Е. Гуль. – М.: Химия, 1978. – 316 с.
7. Кулезнев, В. Н. Смеси полимеров / В. Н. Кулезнев. – М.: Химия, 1980. – 304 с.
8. Белый, В. А. Металлополимерные системы / В. А. Белый, Ю. М. Плескачевский. – М.: Знание, 1982. – 64 с.
9. Щербаков, С. В. Технология, конструирование и эксплуатационные свойства комбинированных машиностроительных материалов и изделий : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / С. В. Щербаков. – Минск, 1983. – 32 с.
10. Неверов, А. С. Создание и исследование герметизирующих и консервационных материалов для машиностроения на основе полиэтилена : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. С. Неверов. – Минск, 1978. – 14 с.
11. Гольдаде, В. А. Низкомодульные композиционные материалы на основе термопластов / В. А. Гольдаде, А. С. Неверов, Л. С. Пинчук ; под ред. А. И. Свириденка. – Минск: Наука и техника, 1984. – 231 с.
12. Металлополимерные изделия и материалы / В. А. Белый [и др.] ; под ред. В. А. Белого. – М.: Химия, 1979. – 312 с.
13. Струк, В. А. Конструкционные материалы на основе технологических отходов / В. А. Струк, А. Ф. Мануленко, Г. Г. Коляго. – Минск: БелНИИНТИ, 1987. – 40 с.
14. Скаскевич, А. А. Структура и технология малонаполненных машиностроительных материалов на основе конструкционных термопластов, модифицированных углеродными нанокластерами : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Скаскевич. – Минск, 2000. – 18 с.
15. Полимер-силикатные машиностроительные материалы: физико-химия, технология, применение / С. В. Авдейчик [и др.] ; под ред. В. А. Струка, В. Я. Щербы. – Минск: Тэхналогія, 2007. – 431 с.
16. Покидько, Б. В. Адсорбционное модифицирование слоистых силикатов для получения полимер-силикатных нанокомпозитов : дис. ... канд. хим. наук / Б. В. Покидько. – М., 2005. – 120 с.
17. Трибохимические технологии функциональных композиционных материалов : в 2 ч. / С. В. Авдейчик [и др.] ; под ред. В. А. Струка, Ф. Г. Ловшенко. – Гродно: ГГАУ, 2007–2008. – Ч. 1: Модельные представления. – 2007. – 320 с.
18. Нанокомпозиционные машиностроительные материалы: опыт разработки и применения / С. В. Авдейчик [и др.] ; под ред. В. А. Струка. – Гродно: Гродненск. гос. ун-т им. Я. Купалы, 2006. – 403 с.

19. Плескачевский, Ю. М. Создание машиностроительных металлополимерных материалов и изделий с использованием радиационно-термической обработки : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ю. М. Плескачевский. – Минск, 1984. – 42 с.
20. Виноградов, А. В. Создание и исследование машиностроительных триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и ультрадисперсных сиаонов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01, 05.02.04 / А. В. Виноградов. – Гомель, 1993. – 293 с.
21. Охлопкова, А. А. Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями / А. А. Охлопкова, А. В. Виноградов, Л. С. Пинчук. – Гомель: Ин-т механики металлополимерн. систем НАН Беларуси, 1999. – 164 с.
22. Петрова, П. А. Разработка машиностроительных материалов на основе политетрафторэтилена и природных цеолитов якутских месторождений: (машиностроение) : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / П. А. Петрова. – Гомель, 2002. – 125 с.
23. Бузник, В. М. Состояние отечественной химии фторполимеров и возможные перспективы развития / В. М. Бузник // Рос. хим. журн. – 2008. – Т. LII, № 3. – С. 7–12.
24. Введение в физику наноконпозиционных машиностроительных материалов / С. В. Авдейчик [и др.] ; под науч. ред. В. А. Лиопо, В. А. Струка. – Гродно: ГГАУ, 2009. – 439 с.
25. Cao, Guozhong. Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications / Guozhong Cao, Ying Wang. – World Scientific Publ., 2011. – 581 p.
26. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Наука, 2007. – 416 с.
27. Крыжановский, В. К. Износостойкие реактопласты / В. К. Крыжановский. – Л.: Химия, 1984. – 120 с.
28. Сиренко, Г. А. Антифрикционные карбопластики / Г. А. Сиренко. – Киев: Техника, 1985. – 195 с.
29. Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты : в 5 т. / А. С. Верещагин [и др.] ; под ред. А. В. Киричека. – М.: Изд. дом «Спектр», 2015. – Т. V. – 464 с. – Разд. 1. – С. 33–144.
30. Особенности структуры наноконпозиционных механоактивированных кремнийсодержащих частиц / Н. З. Ляхов [и др.] // Весн. Гродз. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2012. – № 3 (137). – С. 32–40.
31. Эйсымонт, Е. И. Зарядовая активность механоактивированных частиц неорганических веществ / Е. И. Эйсымонт, Е. В. Овчинников, Т. Ф. Григорьева // Весн. Гродз. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2012. – № 4 (141). – С. 101–112.
32. Барамбойм, Н. К. Механохимические явления при экструзии смеси полипропилен + поликапроамид / Н. К. Барамбойм, В. Ф. Ракитянский // Пласт. массы. – 1971. – № 11. – С. 34–35.
33. Барамбойм, Н. К. Механохимия высокомолекулярных соединений / Н. К. Барамбойм. – М.: Химия, 1978. – 384 с.
34. Кербер, М. Л. Модифицирование полимерных материалов в ходе их переработки / М. Л. Кербер // Пласт. массы. – 1971. – № 5. – С. 59–66.

References

1. Gol'dade V.A., Struk V.A., Pesetskii S.S. *Wear Inhibitors of Metal Polymer Systems*. Moscow, Khimiya Publ., 1993, 240 p. (In Russian).
2. Struk V.A. *Tribochemical concept of creation of anti-friction material on the basis of tonnage produced polymer binders*. Gomel, 1988, 240 p. (In Russian).
3. Gul' V.E., Kuleznev V.N. *Structure and mechanical properties of polymers*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1979. 352 p. (In Russian).
4. Babaevskii P.G., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. *Plastics of constructional purposes (thermosets)*. Moscow, Khimiya Publ., 1974. 304 p. (In Russian).
5. Sperling L.H. *Interpenetrating Polymer Networks and Related Materials*. New York, Springer, 1981. 327 p. Doi: 10.1007/978-1-4684-3830-7
6. Gul' V.E. *The structure and strength of the polymers*. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 316 p. (In Russian).
7. Kuleznev V.N. *Mixtures of the polymers*. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 304 p. (In Russian).
8. Belyi V.A., Pleskachevskii Yu.M. *Metal Polymer Systems*. Moscow, Znaniye Publ., 1982. 64 p. (In Russian).
9. Shcherbakov S.V. *Technology, design and operation characteristics of the combined engineering materials and products*. Minsk, 1983. 32 p. (In Russian).
10. Neverov A.S. *Creation and research and conservation of sealing materials for engineering based on polyethylene*. Minsk, 1978. 14 p. (In Russian).
11. Gol'dade V.A., Neverov A.S., Pinchuk L.S. *Low modulus composite materials based on thermoplastic*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1984. 231 p. (In Russian).
12. Belyi V.A., Egorenkov N.I., Koretskaya L.S., Krasovskii A.M., Pinchuk L.S. *Metal-polymeric products and materials*. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 312 p. (In Russian).
13. Struk V.A., Manulenko A.F., Kolyago G.G. *Construction materials on the basis of technological waste*. Minsk, Belarusian Scientific Research Institute of Scientific and Technical Information and Technical and Economic Research, 1987. 40 p. (In Russian).

14. Skaskevich A.A. *Structure and technology of low-filled engineering materials based on engineering thermoplastics modified with carbon nanoclusters*. Minsk, 2000. 18 p. (In Russian).
15. Avdeichik S.V., Liopo V.A., Struk V.A., Prushak V.Ya., Dmitrochenko V.V., Protaseny A.V. *The polymer-silicate engineering materials: physics and chemistry, technology, application*. Minsk, Tehnologiya Publ., 2007. 431 p. (In Russian).
16. Pokid'ko B.V. *Adsorptive modifying of laminated silicates for reception of polymer-silicate nanocomposites*. Moscow, 2005. 120 p. (In Russian).
17. Avdeichik S.V., Kravchenko V.I., Lovshenko F.G., Lovshenko G.F., Ovchinnikov E.V., Struk V.A. *Tribochemical technology of functional composite materials*. Grodno, Grodno State Agrarian University, 2007. 320 p. (In Russian).
18. Avdeichik S.V., Kostyukovich G.A., Kravchenko V.I., Lovshenko F.G., Lovshenko G.F. *Nanocomposite engineering materials: experience in the development and application*. Grodno, Yanka Kupala State University of Grodno, 2006. 403 p. (In Russian).
19. Pleskachevskii Yu.M. *Creation of engineering metal-polymer materials and products using the radiation-heat treatment*. Minsk, 1984. 42 p. (In Russian).
20. Vinogradov A.V. *Creation and research of engineering tribological materials based on PTFE and ultrafine sialons*. Gomel, 1993. 293 p. (In Russian).
21. Okhlopkova A.A., Vinogradov A.V., Pinchuk L.S. *Plastics, filled with ultrafine inorganic compounds*. Gomel, National Academy of Sciences of Belarus. V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute, 1999. 164 p. (In Russian).
22. Petrova P.A. *Development of engineering materials based on polytetrafluoroethylene and natural zeolites of Yakutian fields*. Gomel, 2002. 125 p. (In Russian).
23. Buznik V.M. State of domestic fluoropolymers chemistry and its possible development prospects. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2008, vol. LII, no. 3, pp. 7–12. (In Russian).
24. Avdeichik S.V., Liopo V.A., Ryskulov A.A., Struk V.A. *Introduction to the physics of nanocomposite engineering materials*. Grodno, Grodno State Agrarian University, 2009. 439 p. (In Russian).
25. Guozhong Cao, Ying Wang. *Nanostructures and nanomaterials*. World Scientific Publ., 2011. 581 p. Doi: 10.1142/7885
26. Gusev A.I. *Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology*. Moscow, Nauka Publ., 2007. 416 p. (In Russian).
27. Kryzhanovskii V.K. *Wear-resistant thermosets*. Leningrad, Khimiya Publ., 1984. 120 p. (In Russian).
28. Sirenko G.A. *Anti-friction carbo plastics*. Kiev, Tekhnologiya Publ., 1985, 195 p. (In Russian).
29. Vereshchagin A.S., Voznyakovskii A.P., Grigor'eva T.F., Kirillov O.N., Kozlov A.M., Kozlov A.A., Liopo V.A., Mandrykin A.V., Mokritskii B.Ya., Morozova A.V., Ovchinnikov E.V., Panaioti V.A., Petreshin D.I., Popov S.A., Prushak D.A., Ryazantsev A.Yu., Skrygin O.V., Smolentsev V.P., Struk V.A., S'yanov S.Yu., Fedonin O.N., Khandozhko A.V., Eisyment E.I. *Innovative engineering technologies, equipment and tools. Volume V*. Moscow, Publishing House "Spectrum", 2015, pp. 33–144. (In Russian).
30. Lyakhov N.Z., Ovchinnikov E.V., Grigor'eva T.F., Eisyment E.I. Features of the structure of nanocomposite mechanically activated silicon particles. *Vesnik GrDU imya Yanki Kupaly. Ser. 6. Tekhnika* [Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science], 2012, no. 3 (137), pp. 32–40. (In Russian).
31. Eisyment E.I., Ovchinnikov E.V., Grigor'eva T.F. Charge Activity of mechanically activated particles of inorganic substances. *Vesnik GrDU imya Yanki Kupaly. Ser. 6. Tekhnika* [Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science], 2012, no. 4 (141), pp. 101–112. (In Russian).
32. Baramboim N.K., Rakityanskii V.F. Mechanochemical effects in the extrusion of mixture of polypropylene + polycapraamide. *Plasticheskie massy* [Plasticheskie massy], 1971, no. 11, pp. 34–35. (In Russian).
33. Baramboim N.K. *Mechanochemistry macromolecular compounds*. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 384 p. (In Russian).
34. Kerber M.L. Modification of polymeric materials during their processing. *Plasticheskie massy* [Plasticheskie massy], 1971, no. 5, pp. 59–66. (In Russian).

Информация об авторах

Авдейчик Сергей Валентинович – кандидат технических наук, доцент, инженер, ООО «Молдер» (ул. Скидельское шоссе, 18, 230011, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: molder.grodno@gmail.com

Струк Василий Александрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИЧ, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы (ул. Ожешко, 22, 230023, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: sorvg63@mail.ru

Эйсмонт Евгения Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и методов управления, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы (ул. Ожешко, 22, 230023, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: gffh@mail.ru

Information about the authors

Avdeychik Sergey Valentinovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, engineer, LLC "Molder" (18, Skidelsky Highway, 230011, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: molder.grodno@gmail.com

Struk Vasily Aleksandrovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Chief Research Officer of R&D Department, Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: sorvg63@mail.ru

Eisyment Yevgenia Ivanovna – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of Department of Logistics and Management Methods, Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: gffh@mail.ru

Для цитирования

Авдейчик, С. В. Энергетический критерий выбора дисперсных модификаторов высокомолекулярных матриц / С. В. Авдейчик, В. А. Струк, Е. И. Эйсымонт // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 31–44.

For citation

Avdejchik S.V., Struk V.A., Eysymont Y.I. Energy criterion of selection of high-molecular matrix dispersed modifiers. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnych navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 31–44. (In Russian).

**А. Л. Козловский^{1,2}, Д. Б. Боргеков^{1,2}, М. В. Здоровец^{1,3}, Е. Архангельский⁴,
Е. Е. Шумская⁵, Е. Ю. Каниуков⁵**

¹*Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан*

²*Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

³*Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия*

⁴*Школа инженерии, Назарбаев университет, Астана, Казахстан*

⁵*Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь*

ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН В ПРОЦЕССАХ ПРЯМОГО И ОБРАТНОГО ОСМОСА

Рассмотрена методика получения полиэтилентерефталатовых трековых мембран с асимметричной (конусообразной) формой поры с применением ионно-трековой технологии. Метод состоит из двух основных этапов: облучения быстрыми тяжелыми ионами и одностороннего травления латентных треков. С помощью сканирующей электронной микроскопии поверхностей и поперечных сечений мембран, полученных при различных временах травления, охарактеризованы форма и размеры отдельных пор трековых мембран. На основании этих результатов определена временная зависимость диаметров основания и вершины конуса асимметричных пор. По результатам исследования асимметричных трековых мембран с порами конической формы путем измерения степени гидрофильности, производительности по воздуху и воде была установлена возможность применения мембран для прямого и обратного осмоса. На основе анализа прочности на разрыв под нагрузкой с медленно меняющимся давлением определено давление, которое способна выдержать мембрана, а также установлена зависимость характеристик прочности образцов от их пористости. Моделирование осмотических процессов в растворе NaCl продемонстрировало эффективность трековых мембран для прямого и обратного осмоса и показано влияние параметров мембран на их производительность и степень очистки воды.

Ключевые слова: трековые мембраны, ионно-трековая технология, осмос.

A.L. Kozlovskiy^{1,2}, K.K. Borgokov^{1,2}, M.V. Zdorovets^{1,3}, E. Arkhangelsky⁴, A.E. Shumskaya⁵, E.Yu. Kaniukov⁵

¹*Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

²*L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

³*Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia*

⁴*School of Engineering, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan*

⁵*Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

APPLICATION OF TRACK MEMBRANES IN PROCESSES OF DIRECT AND REVERSE OSMOSIS

A method of design of polyethylene terephthalate track membranes with asymmetric (conic) pores shaped by ion-track technology was considered. The method consists of two main stages: irradiation by swift heavy ions and one-sided etching of latent tracks. The shape and dimensions of individual pores of track membranes were defined by scanning electron microscopy of surfaces and cross-sections of membranes prepared with different etching times. Based on these results, time dependencies of cone bases and apex diameters of asymmetrical pores were determined. The possibility of the membranes application for direct and reverse osmosis was determined according to the results of investigations asymmetric track membranes with conic shape pores by means of measuring of hydrophilicity, air and water performance. Based on the analysis of tensile strength under loading with slowly changing pressure, the maximum pressure value that the membrane could stare was determined, as well as the dependence of the strength characteristics on the samples porosity. Simulation study of osmotic processes in NaCl solution efficiency of the track membranes for the direct and reverse osmosis was demonstrated and the influence of membrane parameters on their performance and the degree of water purification was showed.

Keywords: track membranes, ion-track technology, osmosis.

Введение. Для разделения жидких сред, очистки природных и сточных вод, выделения ценных химических продуктов используются мембранные технологии, служащие высокоэффективным барьером для задержания взвешенных веществ, коллоидных соединений, различных солей.

Основными потребителями мембранных фильтр-элементов являются жилищно-коммунальное хозяйство, объекты энергетики, промышленные предприятия. При этом наряду с водоподготовкой все более активно мембраны используются как для очистки сточных и технологических вод^{1,2}, так и в различных технологических процессах [1, 2].

Главной проблемой, возникающей при эксплуатации мембранных установок, является их загрязнение, происходящее из-за осаждения частиц твердой фазы в порах, развития микроорганизмов и химического взаимодействия между материалом мембраны и средой. Большинство композитных мембран – это сложные структуры, где поддерживающий слой выполнен из полимеров (например, полисульфонов), а фильтрующие слои – из полиамида или других аналогичных по свойствам материалов. Регенерация мембран в процессе эксплуатации представляет собой сложный технологический процесс, затрудняющийся тем, что большинство органических веществ проявляет хорошие адгезионные свойства к материалам мембран.

Указанная проблема может быть решена за счет использования особого типа мембран – трековых мембран (ТМ), получаемых путем облучения полимерных пленок высокоэнергетичными тяжелыми ионами и последующей физико-химической обработки. В противоположность композитным мембранам ТМ представляют собой нанопористый материал со сквозными порами заданного размера. Благодаря ряду свойств – малая толщина, высокая селективность разделения, легкость регенерации – ТМ выгодно отличаются от мембран других типов, при этом технологический процесс производства ТМ позволяет изготавливать их с относительно низкой себестоимостью и высоким качеством.

С момента создания ионно-трековой технологии были проведены работы как в экспериментальной, так и в теоретической областях рассматриваемой технологии [3]. Наибольший интерес в настоящее время представляют ТМ на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ), так как уже являются коммерческим продуктом с хорошо отработанной технологией производства [4, 5]. Мембраны с диаметрами пор от ~ 0,001 мкм до 10–12 мкм получают путем варьирования условий облучения и химической обработки. Сама же технология травления уникальна, так как при соблюдении условий травления можно получить поры заданного размера при малом отклонении диаметров от средних значений. Учитывая это, ТМ находят применение в аналитическом приложении, а также в биологических, медицинских задачах и фильтрационных процессах.

В нашей работе рассмотрена технология получения ТМ на основе ПЭТФ с асимметричной геометрией пор, исследованы физико-химические и прочностные свойства полученных мембран, а также приведены результаты применения асимметричных ТМ в процессах прямого и обратного осмоса.

Материалы и методы исследования. Исходным материалом для получения ТМ была ПЭТФ пленка толщиной 12 мкм, облученная 1,75 МэВ / нуклон Кг-ионных пучков с флюенсом $1 \cdot 10^6$ см⁻² на циклотроне DC-60 (Астана, Казахстан). Все образцы дополнительно сенсibilизированы УФ-лампой в течение 12 ч с одной стороны для ускорения процесса травления облученного материала. УФ-излучение приводит к фотоокислению поверхностного слоя полимера. Трансформация образовавшихся в результате облучения высокодефектных областей (латентных треков) в поры производили посредством двухстороннего химического травления в растворе 2,2 моль/л NaOH при температуре 85 ± 1 °С.

Исследование поверхности, структуры, качества облучения ТМ и расчет плотности распределения пор выполнялись для микрофотографий пленок, полученных на растровом электронном микроскопе JEOL-7500F, в программном обеспечении Marker-12.

Производительность мембран по воздуху определяли при перепаде давления 0,02 МПа, пропуская газ через мембрану площадью 1 см². По величине газопроницаемости рассчитывали эффективный диаметр пор по формуле

¹ Фильтр щелевой: пат. 2335328, Рос. Федерация, В01D29 / 66 / В. А. Большаков, М. В. Гребенков. – Оpubл. 2008.

² Напольный самопромывающийся фильтр: пат. 1831794, Рос. Федерация, В01D29 / 66 / В. И. Гуринов, В. Н. Кольцов. – Оpubл. 1995.

$$r^3 = \frac{Q \cdot 3l}{\sqrt{\frac{2\pi}{RTM} \Delta p \cdot 4n}}, \quad (1)$$

где r – радиус поры, Q – производительность по воздуху, l – толщина пленки, Δp – приложенное давление, R – универсальная газовая постоянная, M – молярная масса воздуха, n – плотность облучения, T – температура.

Производительность мембран по воде определялась на образцах площадью 2,54 см², пропускающей деионизированную воду (18 МОм) через образец ТМ при разности давлений 0,08 и 0,15 МПа. Производительность Q оценивали, используя уравнение

$$Q = \frac{n\pi r^4}{8\mu l} \Delta p, \quad (2)$$

где r – радиус поры, l – толщина пленки, Δp – приложенное давление, n – плотность облучения, μ – динамическая вязкость жидкости.

Степень гидрофильности трековых мембран определялась путем измерения краевого угла смачивания (θ) по методу лежащей капли. Для этого каплю рабочей жидкости порядка 15 мкл наносили из микрошприца на поверхность образцов. Краевой угол смачивания определяли гониометрическим методом, исходя из основных размеров капли и условия, что $\theta < 90^\circ$ по формуле

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{2hr_{\text{к}}}{r_{\text{к}}^2 - h^2}, \quad (3)$$

где θ – краевой угол смачивания, $r_{\text{к}}$ – радиус площади контакта капли с поверхностью, h – высота капли.

Прочность измерялась методом, основанным на определении максимального давления, которое способна выдержать мембрана на лабораторной установке, предназначенной для измерения прочности на разрыв лабораторных образцов трековых мембран при нагружении медленно меняющимся давлением.

Установка для проверки применимости ПЭТФ мембран для осмотического процесса была собрана согласно схеме, представленной в [5, 6]. Для изучения производительности мембраны применялись 10 моль/л NaCl (фильтруемый раствор) и 5 моль/л NaCl (раствор-вытяжка). Скорость прокачки жидкости в системе составляла 23 см/с. Поток жидкости, прошедшей сквозь мембрану, вычислялся по формуле

$$J_W = \frac{1}{A} \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (4)$$

где ΔV – объем жидкости, прошедшей через мембрану, Δt – время, A – площадь мембраны, которая составила 0,003034 м².

В качестве модельной среды для обратного осмоса применялся раствор 1 г/л NaCl, а прикладываемое давление составило 0,32 МПа.

Результаты и их обсуждение. Анализ современных литературных данных показывает, что наиболее часто используемым методом для получения конусообразных нанопор является кондуктометрический метод травления, при котором сенсibilизация и последующее травление полимерной пленки выполняется с одной стороны. Для получения асимметричных пор в трековых мембранах на основе ПЭТФ кондуктометрическим методом была разработана кондуктометрическая ячейка для травления. На рис. 1 показана схема кондукто-

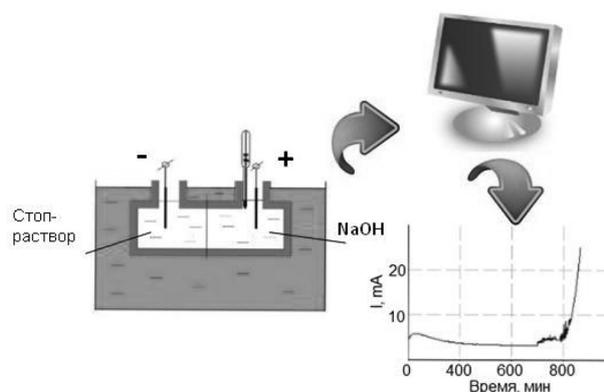


Рис. 1. Схема проведения асимметричного травления с применением кондуктометрической ячейки, подключенной к персональному компьютеру

Fig. 1. Schematic view of the asymmetric etching using a conductivity cell connected to a personal computer

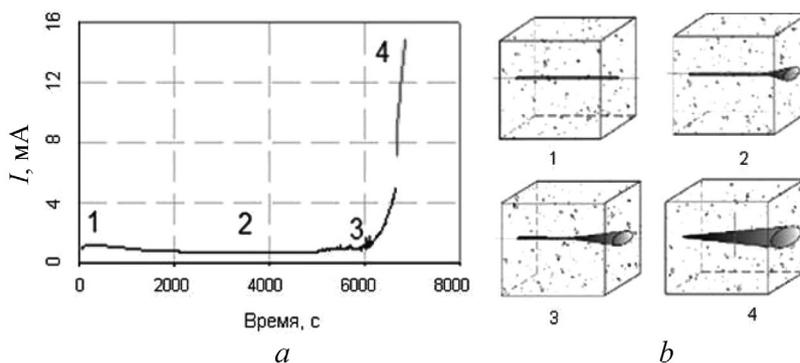


Рис. 2. Процесс травления с получением конусообразных пор: хроноамперограмма (а), схема поэтапного разрастания конусообразных пор (б)

Fig. 2. The etching process with producing conical pores: chronoamperogram (a), step-by-step schematic view of conic pores outgrowth (b)

метрической ячейки, в которой можно проводить процесс травления в диапазоне температур от 25 до 85 °С.

Техника получения нанопор конической формы состоит из следующих последовательных операций:

- 1) одностороннее травление до стадии достижения точки пробоя;
- 2) тщательная промывка мембраны в растворах нейтрализации и деионизированной воде;
- 3) двустороннее травление с низкой концентрацией травильных растворов. Травление прекращается по истечении определенного заранее времени;
- 4) тщательная промывка мембраны в растворах нейтрализации и деионизированной воде, последующая сушка в течение 10–12 ч при комнатной температуре;
- 5) анализ структуры треков (с помощью сканирующей электронной микроскопии и методом реплик).

Контроль за травлением проводился методом кондуктометрии. На рис. 2 представлена хроноамперограмма процесса одностороннего травления и схема поэтапного разрастания конусообразных пор.

Из графика видно, что в период травления от 0 до 5000 с происходит плавное травление треков с одной стороны (этапы 1 и 2). В период времени 5500–6500 с треки полностью растравливаются (этап 3) и происходит электрический пробой, так как ионы травителя проникают в стоп-раствор и устремляются к катоду. При этом резко увеличивается сила тока. На следующем этапе происходит медленное двустороннее травление пор и формирование треков заданной конусообразной геометрии (этап 4). На рис. 3 показаны полученные на растровом электронном микроскопе изображения бокового склона трековой мембраны с конусообразной геометрией пор.

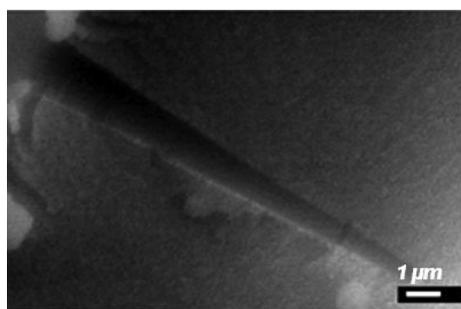


Рис. 3. Полученные на растровом электронном микроскопе изображения бокового склона мембраны

Fig. 3. Imaging of membrane cross-section from scanning electron microscope

В табл. 1 представлены значения диаметров основания ($d_{\text{осн}}$) и вершины ($d_{\text{в}}$) конусообразных пор для полученных при разных значениях тока (I) образцов трековых мембран.

Как видно из представленных данных, при увеличении силы тока в процессе травления наблюдается рост значений диаметра вершины, причем в диапазоне 10–25 мА величина диаметра возрастает резко, в то время как при 25–40 мА увеличение диаметров асимметричных треков происходит плавно. Определив зависимость диаметров от величины силы тока и время травления, можно контролировать геометрию получаемых ТМ для решения конкретных задач фильтрации, в том числе и в процессах прямого и обратного осмоса.

Таблица 1. Экспериментальные значения диаметров основания и вершины конуса асимметричных пор

Table 1. Experimental values of the diameters of the basis and apex of the cone of asymmetric pores

Параметр	Образец 1	Образец 2	Образец 3
I , мА	15	25	40
$d_{\text{осн}}$, нм	$847 \pm 0,0163^*$	$905 \pm 0,0127$	$911 \pm 0,0121$
$d_{\text{в}}$, нм	$15,24 \pm 0,0131$	$24,193 \pm 0,0124$	$30,089 \pm 0,0161$

Примечание: данные представлены в условиях стандартного отклонения 10 измерений.

Одной из важных характеристик ТМ с асимметричной геометрией пор является прочность на разрыв. Результаты исследований прочностных свойств исследуемых образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики исследуемых образцов

Table 2. Characteristics of investigated samples

Номер образца	Максимальное значение давления, при котором мембрана сохраняет свои прочностные свойства, МПа	Пористость, %	Контактный угол смачивания (лицо/изнанка)
1	0,61	1,5	$57^\circ/73^\circ$
2	0,56	2,4	$55^\circ/69^\circ$
3	0,53	3,1	$53^\circ/66^\circ$

Проанализировав значения давления, приложенного для определения прочности мембран, можно сделать вывод, что ТМ, полученные в результате асимметричного травления, обладают высокими прочностными свойствами. При увеличении диаметра пор во время травления происходит спад прочностных свойств, обусловленный увеличением коэффициента пористости.

На рис. 4 представлены рабочие характеристики трековых мембран при использовании в процессе прямого и обратного осмоса.

Разница в значениях теоретического расчета и экспериментальных данных обусловлена геометрией асимметричных треков. Увеличение производительности для асимметричных мембран объясняется снижением вихревых течений, которые возникают в процессе движения воды по каналу поры.

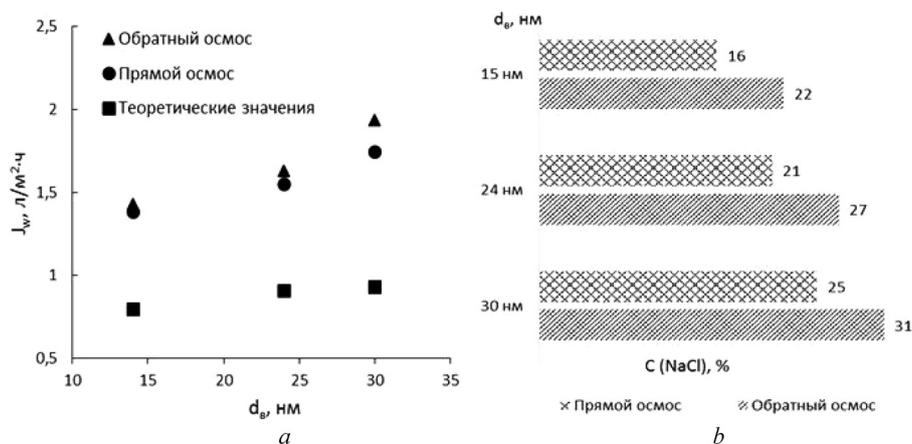


Рис. 4. Рабочие характеристики трековых мембран при использовании их в процессе прямого и обратного осмоса: зависимости изменения потока жидкости J_w от диаметра вершины конуса d_v (a), изменения концентрации NaCl в растворе до и после фильтрации в зависимости от диаметра вершины конуса d_v (b)

Fig. 4. The performance characteristics of track membranes used in process of forward and reverse osmosis: dependence of the diffusion flux changes J_w of the apex of the cone diameter d_v (a), and dependence of NaCl concentration in the solution before and after filtration of the apex of the cone diameter d_v (b)

Как видно из данных, представленных на рис. 4, *b*, *c* уменьшением диаметра вершины конуса поры наблюдается увеличение степени очистки, то есть снижения концентрации процентного содержания NaCl в отфильтрованной жидкости. При этом степень очистки асимметричных ТМ для процессов прямого осмоса выше, так как при фильтрации в процессах прямого осмоса отсутствует прикладываемое давление.

Заключение. В работе рассмотрено получение трековых мембран на основе ПЭТФ с асимметричной геометрией трека методом одностороннего травления. Кондуктометрический метод получения асимметричных треков позволяет получать конусные поры с массивным основанием конуса и вершиной порядка 20–50 нм, высокими прочностными свойствами, производительностью по воде, а также степенью очистки.

Таким образом, полученные методом одностороннего травления асимметричные трековые мембраны показали себя как эффективный фильтрующий барьер в процессах, осуществляемых под действием гидравлического или осмотического давления.

Благодарность

Работа выполнена в рамках программы целевого финансирования № 561 от 07.04.2015 г. и проекта «Разработка высокопродуктивных трековых мембран прямого осмоса» (№ 3649/ГФ4-15-ОТ; 2015–2017), финансируемых Министерством образования и науки Республики Казахстан.

Acknowledgement

This work was carried out within the framework of targeted funding program N 561 at 07.04.2015 and of the project “Design of high productive track membranes for direct osmosis” (N 3649/ГФ4-15-ОТ; 2015–2017), funded by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan.

Список использованных источников

1. Oganessian, Yu. Ts. Track-etched membranes in biomedical and biotechnological processes / Yu. Ts. Oganessian, S. N. Dmitriev, Yu. E. Penionzhkevich // Works of International school-seminar on heavy ion physics “International workshop on applied nuclear physics research”. – Dubna, 1997. – P. 278.
2. Дифракционные фильтры на основе полиамидных и полиэтилентерефталатных трековых мембран / А. В. Митрофанов [и др.] // Журн. техн. физики. – 2006. – Т. 76, № 9. – С. 121–127.
3. Cao, L. Fabrication and investigation of single track-etched nanopore and its applications / L. Cao, Y. Wang // Radiation Measurements. – 2009. – Vol. 44, N 9–10. – P. 1093–1099.
4. Characterization of novel forward osmosis hollow fiber membranes / R. Wang [et al.] // J. Membr. Sci. – 2010. – Vol. 355, N 1–2. – P. 158–167.
5. Mi, B. Chemical and physical aspects of organic fouling of forward osmosis membranes / B. Mi, M. Elimelech // J. Membr. Sci. – 2008. – Vol. 320, N 1–2. – P. 292–302.

References

1. Oganessian Yu.Ts., Dmitriev S.N., Penionzhkevich Yu.E. Track-etched membranes in biomedical and biotechnological processes. *Works of International school-seminar on heavy ion physics “International workshop on applied nuclear physics research”*. Dubna, 1997, p. 278.
2. Mitrofanov A.V., Apel R.Yu., Blonskaya I.V., Orelovich O.L. Diffraction filters based on polyimide and poly(ethylene naphthalate) track membranes. *Technical Physics*, 2006, vol. 51, no. 9, pp. 1229–1234. Doi:1063784206090209
3. Cao L., Wang Y. Fabrication and investigation of single track-etched nanopore and its applications. *Radiation Measurements*, 2009, vol. 44, no. 9–10, pp. 1093–1099. Doi:10.1016/j.radmeas.2009.10.064
4. Wang R., Shi L., Tanga Y.Ch., Choua Sh., Qiub Ch., Fanea A.G. Characterization of novel forward osmosis hollow fiber membranes. *Journal of Membrane Science*, 2010, vol. 355, no. 1–2, pp. 158–167. Doi: 10.1016/j.memsci.2010.03.017
5. Mi B., Elimelech M. Chemical and physical aspects of organic fouling of forward osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*, 2008, vol. 320, no. 1–2, pp. 292–302. Doi: 10.1016/j.memsci.2008.04.036

Информация об авторах

Козловский Артем Леонидович – магистр естественных наук, исполняющий обязанности заведующего лабораторией физики твердого тела, Астанинский филиал Института ядерной физики (пр. Абылай хана, 2/1, 010008, Астана, Республика Казахстан). E-mail: artem88sddt@mail.ru

Information about the authors

Kozlovskiy Artem Leonidovich – Master of Science, Acting Head of the Laboratory of Solid State Physics, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics (2/1, Abylaikhan Ave., Astana, Republic of Kazakhstan, 010008). E-mail: artem88sddt@mail.ru

Боргеков Дарын Боранбаевич – магистр технических наук, инженер технологической лабораторией трековых мембран, Астанинский филиал Института ядерной физики (пр. Абылай хана, 2/1, 010008, Астана, Республика Казахстан). E-mail: borgekov.daryn@gmail.com

Здоровец Максим Владимирович – кандидат физико-математических наук, руководитель лаборатории инженерного профиля, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева (пр. Абылай хана, 2/1, 010008, Астана, Республика Казахстан). E-mail: mzdorovets@gmail.com

Архангельски Елизавета – профессор, Школа инженерии, Назарбаев университет (ул. Кабанбай Батыр, 53, 010000, г. Астана, Республика Казахстан). E-mail: yelyzaveta.arkhangelsky@nu.edu.kz

Шумская Елена Евгеньевна – научный сотрудник отдела криогенных исследований, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Республика Беларусь). E-mail: lunka7@mail.ru

Канюков Егор Юрьевич – ведущий научный сотрудник отдела криогенных исследований, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Республика Беларусь). E-mail: ka.egor@mail.ru

Для цитирования

Применение трековых мембран в процессах прямого и обратного осмоса / А. Л. Козловский [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 45–51.

Borgekov Daryn Boranbaevich – Master of Engineering, engineer of the Technological laboratory of track membranes, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics (2/1, Abylaikhan Ave., 010008, Astana, Republic of Kazakhstan). E-mail: borgekov.daryn@gmail.com

Zdorovets Maxim Vladimirovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of engineering profile, L.N. Gumilyov Eurasian National University (2/1, Abylaikhan Ave., 010008, Astana, Republic of Kazakhstan). E-mail: mzdorovets@gmail.com

Arkhangelsky Elizabeth – Professor, School of Engineering, Nazarbayev University (53, Kabanbay Batyr Ave., 010000, Astana, Republic of Kazakhstan). E-mail: yelyzaveta.arkhangelsky@nu.edu.kz

Shumskaya Alena Evgen'evna – Researcher in Cryogenic Research Division, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lunka7@mail.ru

Kaniukov Egor Yur'evich – Leading Researcher in Cryogenic Research Division, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ka.egor@mail.ru

For citation

Kozlovskiy A.L., Borgekov K.K., Zdorovets M.V., Arkhangelsky E., Shumskaya A.E., Kaniukov E.Yu. Application of track membranes in processes of direct and reverse osmosis. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 45–51. (In Russian).

В. В. Клубович¹, М. М. Кулак², Е. В. Хрущёв¹

¹*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*

²*Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Беларусь*

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБОПРОТЕЗНЫХ ДИСКОВ ИЗ СПЛАВОВ ЗОЛОТА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

При работе с драгоценными металлами необходим поиск таких способов обработки, при которых безвозвратные потери драгоценного металла будут минимальными. В связи с этим необходимо исследовать основные физико-механические свойства драгоценных металлов: прочность, твердость, упругость, пластичность и их коррозионную стойкость; определить влияние температуры обработки на механические характеристики полученных слитков драгметалла. Кроме того, необходимо знать физико-химические свойства металлов, входящих в состав сплава, возможности воздействия на них методами обработки металлов давлением, причем знание таких свойств особенно важно при изготовлении зубопротезных дисков.

В результате исследований установлено, что при прокатке полосы сплава золота 900-й пробы исходной толщины от 4 до 0,55 мм происходит вытягивание зерен в направлении прокатки, предел прочности сплава ЗлСрМ 900-40 увеличивается почти в 2 раза и отжиг при температуре 650 °С в течение 3 мин полностью восстанавливает пластические свойства сплава.

Ключевые слова: сплав золота, зубопротезные диски, прокатка, наклеп, уширение, очаг деформации, пластическая деформация, дробная деформация, отжиг.

V.V. Klubovich¹, M.M. Kulak², E.V. Khrushchov¹

¹*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

²*The Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus, Vitebsk, Belarus*

DEVELOPMENT OF MANUFACTURING TECHNIQUES OF DENTOPROSTHETIC DISKS FROM GOLD ALLOYS AND THE RESEARCH OF THEIR PROPERTIES

Searching of such ways of processing at which irrevocable losses of precious metal will be minimum is necessary during the work with precious metals. In this regard it is necessary to investigate the main physico-mechanical properties of precious metals: durability, hardness, elasticity, plasticity and their rust resistance; to define temperature effect of processing on mechanical characteristics of the obtained precious metal ingots. Besides it is necessary to know physical and chemical properties of the metals which are a part of alloy, their workability by methods of metal forming, and knowledge of such properties is especially important at manufacture of dentoprosthetic disks.

As a result of researches it is established that when rolling a strip of gold alloy of 900 fineness from initial thickness 4 mm to 0.55 mm, there is an extraction of grains in the direction of rolling; ultimate strength of alloy of AuAgCu 900-40 increases almost twice. Further annealing at temperature of 650 °C for 3 minutes completely restores plastic properties of the alloy.

Keywords: gold alloy, dentoprosthetic discs, rolling, peening, broadening, deformation center, plastic strain, fractional deformation, annealing.

Введение. При работе с драгоценными металлами необходим поиск таких способов обработки, при которых безвозвратные потери драгоценного металла будут минимальными [1].

В связи с этим необходимо исследовать основные физико-механические свойства драгоценных металлов: прочность, твердость, упругость, пластичность и их коррозионную стойкость; определить влияние температуры обработки на механические характеристики полученных слитков драгметалла [2]. Кроме того, необходимо знать физико-химические свойства металлов, входящих в состав сплава, возможности воздействия на них методами обработки металлов давлением, причем знание таких свойств особенно важно при изготовлении зубопротезных дисков.

Материалы и методы исследования. Согласно постановлению Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 72 от 14.08.2007 г. «Инструкция о порядке приема, учета, хранения, использования драгоценных металлов для зубопротезирования» для зубных протезов, коронок, мостовидных протезов используется сплав золота 900-й пробы (90 % золота, 4 % серебра и 6 % меди (ЗлСрМ 900-40)).

Полный технологический цикл изготовления стоматологических дисков из сплава золота 900-й пробы состоит из трех основных стадий: первая – получение литьем заготовок для механической обработки, вторая – прокатка заготовок в полосу и третья – изготовление дисков путем вырубки на штампах.

На первой стадии после проведения централизованной и окислительной плавок, когда получают сплав 900-й пробы, из него отливают слитки необходимой ширины толщиной 4 мм. Перед разливкой сплава золота изложницы нагревают до температуры 60–100 °С и смазывают пчелиным воском.

Затем слитки охлаждают в проточной холодной воде, очищают от посторонних примесей и грязи. После взвешивания слитки передают для механической обработки путем продольной прокатки до толщины полосы 0,3 мм.

Прокатку слитков золота осуществляют на двухвалковом лабораторном прокатном стане. В результате действия приложенных сил со стороны валков металл течет не только в продольном, но и в поперечном направлении, вследствие этого ширина полосы при выходе из валков всегда несколько больше исходной ширины.

Уширение в большинстве случаев представляет собой отрицательное явление. Оно снижает общую вытяжку при прокатке и вызывает в боковых кромках прокатываемой полосы значительные растягивающие напряжения [3].

На величину уширения при прокатке оказывает влияние много факторов: обжатие, диаметр валков, ширина и толщина полосы, контактное трение, температура, скорость прокатки, натяжение и др. Причем уширение увеличивается с ростом обжатия, диаметра валков, коэффициента трения и скорости прокатки и снижается при применении натяжения и с уменьшением толщины полосы. Обжатие при прокатке является одним из основных параметров, влияющих на величину абсолютного и относительного уширения. С увеличением обжатия увеличивается уширение.

Нами была изучена зависимость уширения Δb от ширины полосы b из золотого сплава ЗлСрМ 900-40 (рис. 1).

Как видно на рис. 1, зависимость уширения от ширины полосы золотого сплава ЗлСрМ 900-40 имеет сложный характер, достигая максимума при сравнительно небольшой ширине. Это объясняется тем, что при прокатке узких полос из золотого сплава ЗлСрМ 900-40 уменьшается поперечное напряжение, в связи с чем растет уширение. С увеличением ширины полосы действие подпирющих сил трения в поперечном направлении увеличивается; ввиду этого растет величина поперечного напряжения, что влечет за собой уменьшение уширения. По мере роста ширины полосы уширение возрастает, но до определенного предела, после чего увеличение ширины полосы вызывает уменьшение величины уширения.

Кроме этого, в работе было изучено изменение уширения в зависимости от дробности деформации. Для исследований были взяты полосы золотого сплава ЗлСрМ 900-40 шириной 20 мм, толщина полосы составляла 4 мм. Величина степени деформации за переход составляла в среднем 2–3 % (рис. 2).

Анализ рис. 2 показывает, что дробная деформация при прокатке способствует значительному уменьшению поперечной деформации и увеличивает продольную деформацию металла. Это можно объяснить следующими причинами. При сравнении очага деформации при прокатке за один проход и дробном режиме деформирования видно, что протяженность очага деформации в плоскости дуги захвата при прокатке за один проход значительно больше.

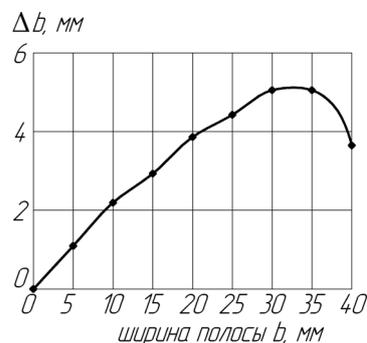


Рис. 1. Влияние исходной ширины полосы из сплава ЗлСрМ 900-40 на уширение

Fig. 1. Influence of initial width of alloy band of AuAgCu 900-40 on broadening

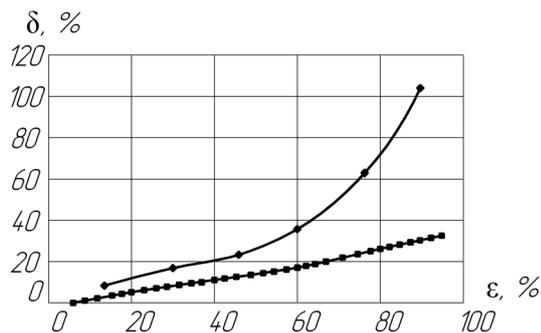


Рис. 2. Изменение относительного уширения при прокатке полосы из сплава ЗлСрМ 900-40 в зависимости от степени деформации: \blacklozenge – прокатка за один проход; \blacksquare – дробная прокатка (степень деформации за один проход составляла 2–3 %)

Fig. 2. Change of the relative broadening when rolling a strip from alloy of AuAgCu 900-40 depending on the degree of deformation: \blacklozenge – 1 one pass rolling; \blacksquare – fractional rolling (deformation at one pass was 2–3 %)

При прокатке с малыми единичными обжатиями за проход происходит значительное уменьшение очага деформации в плоскости дуги захвата при сохранении неизменным протяженности очага деформации в плоскости длины бочки валков. Согласно закону наименьшего сопротивления в случае возможности перемещения точек деформируемого тела в различных направлениях каждая его точка перемещается в направлении наименьшего сопротивления. Поэтому изменение очага деформации при дробной прокатке в связи с уменьшением его протяженности в плоскости дуги захвата способствует более интенсивному течению металла в продольном направлении. Соотношение между продольной и поперечной деформацией при прокатке с различными режимами должно рассматриваться с точки зрения влияния «жестких концов» на особенности течения металла в очаге деформации.

При прокатке за один проход протяженность очага деформации в плоскости дуги захвата значительно больше, а значит, и расстояние между входящим и выходящим «жесткими концами» больше. Увеличение расстояния между «жесткими концами» в связи с увеличением протяженности длины области деформации при сохранении ее ширины облегчает течение металла в поперечном направлении. Кроме того, величина уширения зависит от величины контактного трения. С увеличением трения происходит увеличение поперечной деформации в очаге деформирования.

Так как величина трения при прокатке находится в непосредственной связи с удельными давлениями в области очага деформации, то увеличение степени деформации в отдельном проходе приведет к увеличению удельных давлений, а вместе с ними и величины трения, вследствие чего возрастет поперечная деформация металла.

Наклепанный металл уширяется значительно меньше по сравнению с металлом в отожженном состоянии. Так как при каждом последующем пропуске при дробной прокатке деформируется металл, получивший уже некоторую степень упрочнения в предыдущих пропусках, то очевидно, что при дробной прокатке будет наблюдаться меньшая величина уширения.

Наряду с этим наличие определенной текстуры при прокатке по дробному режиму деформирования способствует в каждом последующем пропуске перемещению металла в продольном направлении и затрудняет перемещение металла в поперечном направлении. При этом в связи со значительно меньшей величиной уширения при дробной прокатке текстура у полос, прокатанных по дробному режиму деформирования, будет более выражена по сравнению с полосами, деформированными за один проход, при одинаковых суммарных степенях деформации.

Рассмотрим особенности течения металла в продольном и поперечном направлениях при прокатке за один проход и дробном режиме деформирования. Для дробного режима прокатки по мере увеличения суммарной степени деформации уширение увеличивается незначительно по зависимости, близкой к линейной. Относительное уширение при дробной прокатке для суммарной степени деформации около 95 % достигает величины порядка 35 %. Увеличение относительного уширения при прокатке за один проход происходит по зависимости, близкой к параболической. Относительное уширение при прокатке за один проход при средних степенях деформации относительно невелико и при степени деформации около 50 % составляет 25 %. Значительное увеличение относительного уширения при прокатке за один проход наблюдается в области степеней деформации 50–95 %. Так, относительное уширение при прокатке в малое количество пропусков до суммарных степеней деформации около 95 % составляет 115 % (см. рис. 2). Это объясняется следующими причинами. При прокатке со степенями деформации, превосходящими 50 %, металл значительно упрочняется, вследствие чего возрастают удельные давления, а зна-

чит, и величина контактного трения, что ведет к увеличению уширения. Одновременно происходит увеличение протяженности очага деформации в плоскости дуги захвата, что также в связи с увеличением расстояния между входящим и выходящим «жесткими концами» приводит к увеличению уширения.

Кроме того, при прокатке с большими обжатиями за проход увеличивается роль выходящего «жесткого конца». При начальной стадии прокатки по мере входа металла в зев валков процесс происходит при наличии только одного входящего «жесткого конца», ограничивающего течение металла в поперечном направлении, поэтому с увеличением обжатия в связи с ростом длины очага деформации влияние входящего «жесткого конца» на поперечную деформацию металла уменьшается, а уширение возрастает. В результате этого при переходе к установившемуся процессу прокатки металл в очаге деформирования будет находиться как под действием входящего узкого «жесткого конца», так и под действием выходящего широкого «жесткого конца». Возрастание обжатия при прокатке способствует увеличению уширения в начальной стадии прокатки и формированию более широкого выходящего «жесткого конца», что, несомненно, приведет к увеличению уширения при установившемся процессе прокатки.

Рассмотрим отношения поперечной деформации к продольной $(B_k/B_0)/(L_k/L_0)$ в зависимости от степени деформации при прокатке полосы из сплава ЗлСрМ 900-40 за один проход и по дробному режиму деформирования (рис. 3).

Как видно на рис. 3, при прокатке за один проход полосы из сплава ЗлСрМ 900-40 по мере увеличения общей степени деформации отношение продольной деформации к поперечной уменьшается менее интенсивно по сравнению с прокаткой по дробному режиму деформирования.

Результаты и их обсуждение. Проведенные эксперименты показывают, что прокатка по дробному режиму деформирования способствует более интенсивному течению металла в продольном направлении и ограничивает перемещение металла в поперечном направлении по сравнению с прокаткой за один проход, при которой несколько уменьшается продольная деформация за счет увеличения поперечной деформации металла. В случае прокатки по дробному режиму деформирования с малыми единичными обжатиями за проход более интенсивно деформируются поверхностные слои полосы, в результате чего боковая поверхность полосы получается вогнутой. При прокатке за один проход более интенсивно деформируются центральные слои полосы, в результате чего боковая поверхность полосы получается выпуклой. Дробная прокатка способствует более интенсивному течению металла в направлении прокатки, при прокатке за один проход наблюдается большая поперечная деформация металла.

Таким образом, в результате проведенных исследований по прокатке полосы из золотого сплава 900-й пробы установлено, что уширение зависит от дробности деформации. Так, при суммарной общей степени деформации 90 % величина относительного уширения полосы составляет 105 % при прокатке за один проход и 30 % при прокатке по дробному режиму со степенью деформации за один проход 2–3 %.

Показано, что прокатка по дробному режиму деформирования интенсифицирует течение металла в продольном направлении, что позволяет уменьшить потери золотого сплава по сравнению с прокаткой за один проход за счет уменьшения ширины полосы.

Кроме изучения процесса прокатки золотых сплавов авторами были проведены исследования микроструктуры полос сплава ЗлСрМ 900-40 после их деформации, а также физико-механические свойства полос и дисков золотых сплавов 900-й пробы.

В процессе прокатки, при пластическом деформировании происходит изменение формы зерен и увеличивается прочность (наклеп).

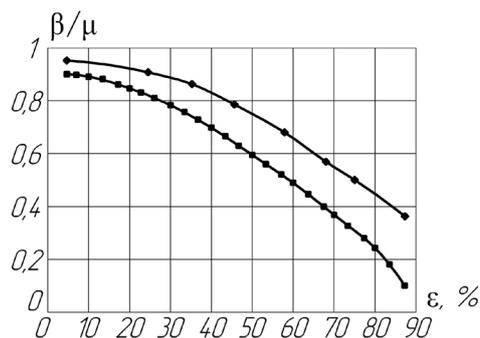


Рис. 3. Изменение отношения коэффициентов продольной μ и поперечной β деформации при прокатке полосы из сплава ЗлСрМ 900-40: \blacklozenge – прокатка за один проход; \blacksquare – дробная прокатка

Fig. 3. Change of the relation of coefficients of longitudinal μ , and lateral β deformation when rolling a strip from alloy of AuAgCu 900-40: \blacklozenge – one pass rolling; \blacksquare – fractional rolling

Исследования сплава $ZrCrM$ 900-40, проведенные нами, показали, что кристаллическая структура пластически деформированного металла характеризуется не только искажением кристаллической решетки, но и определенной ориентировкой зерен, текстурой, а беспорядочно ориентированные кристаллы после кристаллизации под действием деформации поворачиваются осями наибольшей прочности вдоль направления деформации.

С увеличением деформации степень текстурованности возрастает и при больших степенях деформации достигает 100 %, то есть все зерна оказываются одинаково ориентированными. Такой характер пластического течения приводит к изменению внутризеренной структуры – дробятся блоки мозаики с одновременным увеличением степени их разориентировки. Возрастает величина внутренних напряжений, ограниченных (локализованных) малыми объемами. Пластическая деформация приводит металл также в структурно-неустойчивое состояние. Самопроизвольно происходят явления, возвращающие металл в более устойчивое структурное состояние.

К самопроизвольным процессам, которые приводят пластически деформированный металл к более устойчивому состоянию, относятся: снятие искажений кристаллической решетки, рост зерен и другие внутризеренные процессы. Искажения кристаллической решетки снимаются при сравнительно невысокой температуре, так как при этом происходит незначительное перемещение атомов.

На рис. 4 приведена микроструктура полосы сплава $ZrCrM$ 900-40 после прокатки полосы исходной толщины 4 мм до толщины 0,55 мм (общая степень деформации составляет 86,3 %).

Анализ рис. 4 показывает, что при прокатке с увеличением степени деформации происходит вытягивание зерен в направлении прокатки и внутризеренная структура изменяется, блоки мозаики дробятся, внутренние напряжения возрастают, а следовательно, прочностные и пластические свойства сплава также изменяются.

Были проведены измерения изменений механических свойств золотого сплава $ZrCrM$ 900-40 под действием деформации (рис. 5, 6).

Анализ рис. 5 и 6 показывает, что по мере увеличения степени деформации при растяжении полос предел прочности σ_v растет, а относительное удлинение δ падает.

Для снятия наклепа и увеличения пластических свойств сплава применяли отжиг.

Нами установлено, что уже небольшой нагрев (300–400 °С) снимает искажения решетки – результат многочисленных субмикропроцессов – уменьшение плотности дислокаций в результате их взаимного уничтожения, так называемая аннигиляция, слияния блоков, уменьшение внутренних напряжений, уменьшение количества вакансий и т. д. Линии на рентгенограммах деформированного металла, размытые вследствие искажений решетки и нарушений ее правильности, вновь становятся четкими. В результате твердость и прочность несколько понижаются (на 20–30 % по сравнению с исходными), а пластичность возрастает (на 2,5 %).

Низкая температура нагрева и происходящий при ней возврат несколько повышают пластичность, а при достижении температуры 650 °С и выше происходит полная рекристаллизация



Рис. 4. Микроструктура сплава $ZrCrM$ 900-40 после прокатки полосы исходной толщины 4 мм до толщины 0,55 мм (степень деформации составляет 86,3 %)

Fig. 4. The microstructure of a strip of alloy of $AuAgCu$ 900-40 after rolling from initial thickness of 4 mm to thickness of 0.55 mm (deformation is 86.3 %)

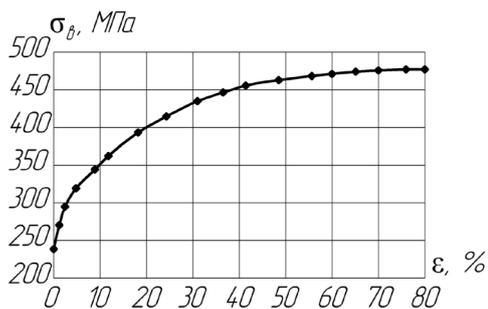


Рис. 5. Изменение предела прочности сплава ЗлСрМ 900-40 в зависимости от степени деформации при растяжении полосы толщиной 0,55 мм после дробного деформирования

Fig. 5. Change of ultimate strength of alloy of AuAgCu 900-40 depending on the degree of deformation at stretching of a strip of 0.55 mm thickness after fractional deformation

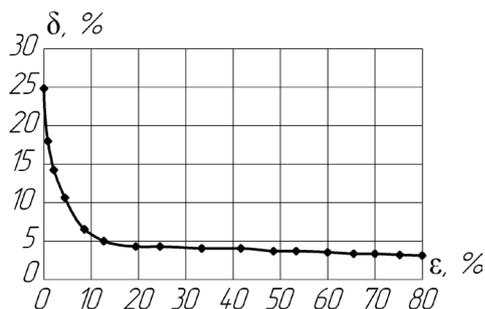


Рис. 6. Изменение относительного удлинения сплава ЗлСрМ 900-40 в зависимости от степени деформации при растяжении полосы толщиной 0,55 мм, полученной дробным деформированием

Fig. 6. Change of the specific elongation of alloy of AuAgCu 900-40 depending on the degree of deformation at stretching of a strip of 0.55 mm thickness after fractional deformation

и восстанавливается исходная (до наклепа) пластичность металла. После того как рекристаллизация (первая стадия) завершена, строение металла и его свойства становятся прежними, то есть которые он имел до деформации.

Температура рекристаллизации имеет важное практическое значение. Чтобы восстановить структуру и свойства наклепанного металла (например, при необходимости продолжить обработку давлением путем прокатки, протяжки, волочения и т. п.), его надо нагреть выше температуры рекристаллизации.

Таким образом, для получения в конечном изделии (диске) необходимых механических характеристик (твердость, пластичность) следует применять отжиг при температуре 650 °С в течение 3 мин для полосы толщиной 0,4 мм. После отжига проводить прокатку до конечной толщины 0,3 мм, затем на штампах производить вырубку дисков необходимого размера.

Выводы

1. При прокатке полосы сплава золота 900-й пробы исходной толщины с 4 до 0,55 мм происходит вытягивание зерен в направлении прокатки, то есть возникает четко выраженная текстура.

2. Предел прочности сплава ЗлСрМ 900-40 при прокатке увеличивается от 24 до 45 кГ/мм², а относительное удлинение уменьшается с 25 до 3 %.

3. Отжиг при температуре 650 °С в течение 3 мин полностью восстанавливает пластические свойства сплава ЗлСрМ 900-40. Температура рекристаллизации сплава ЗлСрМ 900-40 составляет 530 °С (показано при определении пластических свойств путем растяжения готовых пластин сплава).

4. Дальнейшая обработка давлением (прокатка и вырубка) позволяют получить диски с необходимыми механическими характеристиками (твердость, прочность, пластичность, изотропность свойств и равномерное распределение зерен по всему объему дисков).

Список использованных источников

1. Клубович, В. В. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на деформируемость сплавов золота / В. В. Клубович, В. А. Томило // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2014. – № 2. – С. 5–8.
2. Малышев, В. М. Золото / В. М. Малышев, Д. В. Румянцев. – М.: Металлургия, 1979. – 288 с.
3. Северденко, В. П. Прокатка и волочение с ультразвуком / В. П. Северденко, В. В. Клубович, А. В. Степаненко. – Минск: Наука и техника, 1970. – 280 с.

References

1. Klubovich V.V., Tomilo V.A. Investigation of the effect of ultrasound on deformability of gold alloys. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2014, no. 2, pp. 5–8. (In Russian).
2. Malyshev V.M., Romyantsev D.V. *Gold*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 288 p. (In Russian).
3. Severdenko V.P., Klubovich V.V., Stepanenko A.V. *Rolling and drawing with ultrasound*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1970. 280 p. (In Russian).

Информация об авторах

Клубович Владимир Владимирович – академик, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией пластичности, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nil_p@bntu.by

Кулак Михаил Михайлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси (пр. Людникова, 13, 210023, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: mmk_vit@mail.ru

Хрущёв Евгений Викторович – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории пластичности, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nil_p@bntu.by

Для цитирования

Клубович, В. В. Разработка технологии изготовления зубопротезных дисков из сплавов золота и исследование их свойств / В. В. Клубович, М. М. Кулак, Е. В. Хрущёв // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 52–58.

Information about the authors

Klubovich Vladimir Vladimirovich – Academician, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Head of Research Laboratory of Materials Plasticity, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nil_p@bntu.by

Kulak Mikhail Mikhaylovich – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher of the Institute of Technical Acoustics (13, Lyudnikov Ave., 210023, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: mmk_vit@mail.ru

Khrushchev Evgeny Viktorovich – Researcher of Research Laboratory of Materials Plasticity, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nil_p@bntu.by

For citation

Klubovich V.V., Kulak M.M., Khrushchov E.V. Development of manufacturing techniques of dentoprosthetic disks from gold alloys and the research of their properties. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 52–58. (In Russian).

П. В. Занковец

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ПОДГОТОВКИ И СБОРКИ ПОД СВАРКУ
НА ФОРМИРОВАНИЕ БЕЗДЕФЕКТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

С использованием математического моделирования и информационных технологий выполнены исследования и установлены закономерности влияния подготовки и сборки под сварку на формирование бездефектных сварных соединений при изготовлении технологических трубопроводов различных типоразмеров.

Основные факторные параметры подготовки и сборки под сварку, несоблюдение которых приводит к образованию специфических дефектов сварных соединений, – нарушение требований подготовки кромок (угол притупления, радиус скругления), несоответствие нормативным размерам зазора между свариваемыми элементами, нарушение соосности, некачественная зачистка (наличие ржавчины, вмятин, сколов, масел) и прихватка. Для подтверждения полученных результатов и установления структур образующейся дефектности при изготовлении сварных соединений при отрицательных параметрах подготовки и сборки под сварку были проведены экспериментальные исследования. Эксперименты проводили при изготовлении сварных соединений технологических трубопроводов различных типоразмеров ручной дуговой сваркой (РДС), механизированной в среде CO_2 , в смеси $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ и аргонодуговой сваркой (РАДС) в аттестованных сварочных лабораториях базовых предприятий в соответствии с заданиями Государственных программ научных исследований. В результате исследований подтверждены ранее полученные данные статистического анализа дефектности и установлено, что отрицательные параметры фактора подготовки и сборки под сварку являются причиной образования присущей только этому фактору структуры дефектности.

Ключевые слова: ручная дуговая сварка, механизированная сварка в защитных газах, подготовка и сборка под сварку, технологические трубопроводы, сварные соединения, дефектность, причины брака, доминирующие факторы, уровень качества.

P.V. Zankovets

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**REGULARITIES OF WELD PREPARATION AND FIT-UP TECHNOLOGICAL
PROCESS INFLUENCE ON FAULTLESS OF WELDED CONNECTIONS FORMATION**

Joint preparation (root face), overmatched size of the gap, bad fit-up, misalignment, not completed removal of rust, oil and incorrect tack welds are main factorial parameters. Experiments were carried out to confirm theoretical results and to establish schematics of defects, which were formed in production welds when dominated factors were negative.

Research as conducted during construction of technological pipelines of different size with shielded arc welding (SAW), GMAW in CO_2 and $\text{Ar} + \text{CO}_2$ and GTAW. Welding was performed at certified production welding laboratories in accordance with tasks of the State Programs in scientific research. Results confirmed data from previous study in statistical analyzing of defects occurring. It is concluded that negative factors of joint preparation are the cause of forming of defects structure which is unique, related to this only factor.

Keywords: manual arc welding, mechanized gas-shielded arc welding, weld preparation and fit-up, technological pipelines, welded connections, defectiveness, defects reasons, dominating factors, quality level.

Введение. Анализ современного состояния сварочного производства как в Республике Беларусь, так и во всем мире показывает, что проблема формирования бездефектных сварных соединений в условиях монтажа может быть решена только с учетом множества взаимосвязанных факторов, определяющих сложные технологические процессы заготовительных и сборочно-сварочных работ. Это подготовка и сборка под сварку, квалификация исполнителей, свариваемые, сварочные и вспомогательные материалы, сварочное и вспомогательное оборудование, способы и условия сварки, сварочный процесс, организация работ, термообработка, дефектоскопический контроль, квалификация ИТР, время года, ритмичность работ и др. Исследования, выполненные

такими известными учеными, как Б. Е. Патон, В. Н. Волченко, В. И. Махненко, И. Каору, В. И. Троицкий, В. А. Черноусов подтверждают, что для успешного решения поставленной задачи необходимо исследовать взаимосвязь и влияние этих факторов на технологические процессы заготовительных и сборочно-сварочных работ и на этой основе обеспечивать бездефектное формирование сварных соединений [1–5].

Методика исследования влияния подготовки и сборки под сварку на формирование сварных соединений. Подготовка и сборка под сварку является одним из доминирующих факторов, который определяет выходной уровень качества сварных соединений. Брак, допущенный по этому фактору, приводит к специфическим дефектам. Установлено, что эти дефекты генерируются основными факторными причинами – это нарушение требований подготовки кромок (угол притупления, радиус скругления), несоответствие нормативным размерам зазора между свариваемыми элементами, нарушение соосности, некачественная зачистка (наличие ржавчины, вмятин, сколов, масел) и прихватка. Большое значение в технологическом процессе сборочно-сварочных работ имеет также типоразмер сварного соединения (диаметр/длина и толщина свариваемого металла). Установление закономерностей и связей дефектности с причинами ее образования представляется важной задачей, решение которой позволит принимать превентивные меры по их устранению до начала сборочно-сварочных работ, совершенствовать технологические процессы и осуществлять управление качеством сварки в режиме реального времени.

Согласно формулам дефектности базовой совокупности структура дефектности по причинам определяется следующим образом [2–5, 7, 11, 13]:

$$ДП = \frac{\sum D_o}{\sum n} = \frac{\sum П}{\sum n} + \frac{\sum Ш}{\sum n} + \frac{\sum Н}{\sum n} + \frac{\sum \Phi_{ш}}{\sum n} + \frac{\sum Пр}{\sum n}, \quad (1)$$

где ДП – доминирующая причина в структуре дефектности; D_o – общее количество дефектов; n – количество проконтролированных участков; П – поры и их скопления (СПШ); Ш – шлаковые включения; Н – непровары (в корне шва, по кромке, между слоями); $\Phi_{ш}$ – дефекты формы шва; Пр – прочие дефекты.

Выполненные исследования функциональной связи причин с количеством дефектности не выявили [6–9, 12, 14–15]. Однако в результате экспериментальных исследований с использованием информационных технологий (рис. 1) установлена важная статистическая связь структуры образуемой дефектности с ее причинами.

Дата	РГГ или УЭК	Клейно	Кл. 1	Кл. 2	Кл. 3	Пров. стык	Деф. стык	D	S	Пр. шва	Пр. деф.	Причина
08.03.2010	РГГ	М2				62	3	159	5	30954.1	370	Подготовка и сборка
13.03.2010	РГГ	98				5	2	219	6	3438.3	340	Подготовка и сборка
17.03.2010	РГГ	11	С2			8	1	325	6	8164	250	Подготовка и сборка
27.03.2010	УЭК	ЮЮ	22			27	2	273	36	23144.94	420	Подготовка и сборка
30.03.2010	УЭК	Э	РР			7	2	720	8	15825.6	1130	Подготовка и сборка
30.03.2010	УЭК	Э	РР			3	1	630	8	5934.6	495	Подготовка и сборка
17.05.2010	РГГ	99				27	8	720	9	61042	18086	Подготовка и сборка
22.05.2010	РГГ	С				10	2	720	9	22608	4522	Подготовка и сборка
24.05.2010	РГГ	99	С4	ППП		16	14	720	9	36173	31651	Подготовка и сборка
25.05.2010	РГГ	С				14	7	1220	11	53631	26816	Подготовка и сборка
29.05.2010	РГГ	99	ППП			11	7	1220	11	42139	10535	Подготовка и сборка
17.06.2010	РГГ	77				10	4	1220	11	69000	9600	Подготовка и сборка
22.07.2010	УЭК	Т1	Т	В		4	2	640	10	8038	980	Подготовка и сборка
25.07.2010	УЭК	КК	Э			4	2	2220	10	27883	3400	Подготовка и сборка
27.07.2010	УЭК	Т1	Т	Э		4	2	4427	10	55603	6900	Подготовка и сборка
21.08.2010	РГГ	77	ШЩ			15	4	820	9	166200	21300	Подготовка и сборка

Рис. 1. Пример получения статистической информации о дефектности сварных соединений по причинам фактора «Подготовка и сборка под сварку»

Fig. 1. Example of obtaining statistical information on welded connections defectiveness after “fit-up and preparation for welding” factor reasons

Выражение (1) для определения структуры образующейся дефектности по причинам фактора «Подготовка и сборка» можно представить в следующем виде:

$$PC_n = П(X_1) + Ш(X_2) + Н(X_3) + Фш(X_4) + Пр(X_5), \quad (2)$$

где PC_n – структура дефектности по причинам фактора; $n = 1$ – подготовка кромок; $n = 2$ – зазор, соосность; $n = 3$ – прихватка, зачистка; $X_1 - X_5$ – среднее количество конкретных типов дефектов на участке контроля.

Для подтверждения полученных результатов и установления структур образующейся дефектности при изготовлении сварных соединений при отрицательных параметрах доминирующих производственных факторов были проведены экспериментальные исследования [6, 7, 12, 13, 15]. Исследования проводили при изготовлении сварных соединений технологических трубопроводов различных типоразмеров ручной дуговой сваркой (РДС), механизированной в среде CO_2 , в смеси $CO_2 + Ar$ и аргодуговой сваркой (РАДС). Дефектность определяли по данным неразрушающих методов контроля (НМК) – визуального (ВК), рентгенографического (РГГ) и ультразвукового (УЗК).

Изучение вероятностных связей факторных причин с количеством, размерностью, видом и структурой образующейся дефектности проводили при следующих условиях.

1. В соответствии с требованиями СТБ ISO 5817-2009 «Сварка. Соединения стали, никеля, титана и их сплавов, выполненные сваркой плавлением (кроме лучевой сварки). Уровни качества шва в зависимости от дефектов» и СТБ ISO 6520-1-2009 «Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов по геометрическим параметрам в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением» экспертно устанавливаем положительными все параметры доминирующих в формировании сварных соединений производственных факторов – «Подготовка и сборка под сварку», «Сварочные материалы», «Сварочное оборудование», «Сварочный процесс».

2. Изготовление сварных соединений выполняют высококвалифицированные, аттестованные на данный способ сварки сварщики.

3. Типоразмеры сварных соединений, марки свариваемых и сварочных материалов, сварочное и вспомогательное оборудование, способы и условия сварки постоянны.

4. При налаженном технологическом процессе изготавливаем партию сварных стыков определенных типоразмеров.

5. Выполняем контроль качества сварных соединений неразрушающими методами в соответствии с назначением и ответственностью свариваемых конструкций. Согласно СТБ ЕН 970-2003, СТБ 1138-98, СТБ ЕН 1435-2004 трубопроводы диаметром до 112 мм представляют один участок контроля ($L = 150 \div 300$ мм), 289 мм – два участка и 500 мм – пять участков.

6. Получаем образцовую партию бездефектных сварных стыков.

7. В соответствии с разработанным алгоритмом последовательно по каждому из доминирующих факторов устанавливаем один отрицательный параметр (при положительных остальных параметрах) с целью выявления связей причины со структурой образующейся дефектности.

8. Изготавливаем экспериментальную партию сварных стыков. Количество сваренных стыков в опытных партиях может быть различным при соблюдении условий пункта 3.

9. Выполняем 100%-й контроль качества сварных соединений неразрушающими методами.

10. Последовательно исследуем связи между образующейся дефектностью и конкретными отрицательными параметрами каждого из доминирующих факторов.

11. По результатам исследований формируем компьютерные базы данных и знаний, представляющие конкретный доминирующий фактор.

12. Исследуем и анализируем с использованием компьютерных технологий, статистических и вероятностных методов образовавшуюся дефектность по видам, размерам, количеству и структуре [7, 10, 11, 14, 15].

13. Определяем вероятность соответствия отрицательных параметров (причин) структуре образующейся дефектности.

14. В соответствии со структурой образующейся дефектности и ее причинами устанавливаем закономерности формирования бездефектных сварных соединений по каждому из доминирующих факторов.

Согласно условиям проведения экспериментальных исследований по фактору «Подготовка и сборка под сварку» последовательно устанавливали отрицательными его основные параметры при положительных остальных. Изготавливали опытную партию стыков при *специально разлаженном технологическом процессе*.

Закономерности формирования сварных соединений при отрицательных параметрах подготовки и сборки под сварку. В табл. 1 представлены результаты изготовления сварных соединений стыков трубопроводов ручной дуговой сваркой при отрицательном параметре «подготовка кромок». Из таблицы видно, что с увеличением диаметров трубопроводов резко возрастает количество непроваров (между слоями и по кромке шва), в то же время количество остальных дефектов меняется незначительно и в принципе не зависит от типоразмеров сварных соединений.

При изготовлении сварных соединений трубопроводов малых диаметров толщина свариваемых металлов, как правило, не превышает 3 мм, поэтому разделки кромок обычно не требуется. Поэтому и частота и количество непроваров в данном случае не показательны. Таким образом, структура дефектности по причине «подготовка кромок» при ручной дуговой сварке трубопроводов в данных условиях выглядит следующим образом:

$$ПС_1 = П(1,6) + Ш(1,7) + Н(1,9) + Фш(0,6) + Пр(0,5). \quad (3)$$

Таблица 1. Структура дефектности, выявленная по причине «подготовка кромок» при РДС стыков трубопроводов

Table 1. The structure of defectiveness revealed after the “edge preparation” reason under the pipelines joints manual arc welding conditions

Марка стали	Диаметр, мм	Толщина, мм	Сварено стыков, шт.	Забраковано, шт./%	Типы дефектов и их количество									
					П		Ш		Н		Фш		Пр	
					всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.
09Г2	57	2,5	1250	175/14	2190	1,8	2430	1,9	380	0,3	530	0,4	680	0,5
20Х	89	4,0	1270	495/39	2360	1,9	2490	2,0	1790	1,4	520	0,4	690	0,5
14ХГС	112	6,0	2790	1590/57	4150	1,5	4370	1,6	4920	1,8	1280	0,5	1410	0,5
20Х	289	10,0	870	539/62	1230	1,4	1180	1,4	2430	2,8	610	0,7	440	0,5
14ХГС	500	14,0	530	355/67	740	1,4	810	1,5	1670	3,2	430	0,8	220	0,4
Итого			6710	3154/48	10670	1,6	11280	1,7	11190	1,9	3370	0,6	3440	0,5

Выполненными экспериментальными исследованиями установлено, что при отрицательных параметрах «зазор» и «соосность» при сварке стыков трубопроводов образуется практически идентичная структура дефектности. В табл. 2 представлены результаты изготовления сварных соединений стыков трубопроводов ручной дуговой сваркой при отрицательных факторных параметрах «зазор» и «соосность». Видно, что по причинам отрицательных параметров зазора и соосности всего забраковано 62 % опытной партии стыков. Также установлено, что с увеличением диаметров трубопроводов процент брака сварных соединений по этим причинам увеличивается независимо от способа сварки. Так, если при сварке трубопроводов диаметром 57 мм по этим причинам забраковано 32 % стыков, то при сварке трубопроводов диаметром 500 мм забраковано уже 85 % стыков.

Структура дефектности по причинам «зазор» и «соосность» при ручной дуговой сварке трубопроводов в данных условиях выглядит следующим образом:

$$ПС_2 = П(1,7) + Ш(1,7) + Н(2,8) + Фш(2,2) + Пр(0,8). \quad (4)$$

В отличие от структуры дефектности, представленной выражением (3), в результате отрицательных факторных параметров «зазор» и «соосность» значительно увеличилось количество не-

Таблица 2. Структура дефектности, выявленная по причинам «зазор» и «соосность» при РДС стыков трубопроводов

Table 2. The structure of defectiveness revealed after the “flashing gap” and “alignment” reasons under the pipelines joints manual arc welding conditions

Марка стали	Диаметр, мм	Толщина, мм	Сварено стыков, шт.	Забраковано стыков, шт./%	Типы дефектов и их количество									
					П		Ш		Н		Фш		Пр	
					всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.
09Г2	57	2,5	250	80/32	375	1,5	425	1,7	575	2,3	475	1,9	175	0,7
20Х	89	4,0	260	138/53	490	1,9	510	2	590	2,3	520	2	210	0,8
14ХГС	112	6,0	560	353/63	1020	1,8	1040	1,9	1570	2,8	1180	2,1	390	0,7
20Х	289	10,0	220	165/75	750	1,7	790	1,8	1460	3,3	1110	2,5	790	0,8
14ХГС	500	14,0	260	221/85	2340	1,8	2470	1,9	4420	3,4	3510	2,7	1040	0,8
Итого			1550	957/62	4975	1,7	5235	1,7	8615	2,8	6795	2,2	2605	0,8

проваров – 2,8 на участок контроля, и особенно дефектов формы шва – в 3,7 раза. Однако сама структура дефектов осталась практически неизменной.

Завершающий этап технологического процесса «Подготовка и сборка под сварку» – прихватка и зачистка шва и околошовной зоны. Нарушение нормативных требований по правилам установки прихваток и зачистке также вызывает образование недопустимой дефектности в сварных соединениях. Установлено, что по этим причинам также образуется практически идентичная структура дефектности. Однако следует отметить, что невыполнение требований по установке прихваток часто вызывает другую, уже рассмотренную в работе факторную причину брака – нарушение соосности стыков трубопровода. В табл. 3 представлены результаты исследования сварных соединений стыков трубопроводов ручной дуговой сваркой при отрицательных параметрах «зачистка» и «прихватка». Видно, что по причинам в сравнении с установленными в табл. 2 в структуре дефектности значительно возросла частота и количество пор и шлаковых включений. Также практически в 2 раза увеличилось количество прочих дефектов, среди которых преобладают подрезы, наплывы и кратеры.

Структура дефектности по причинам «прихватка» и «зачистка» при ручной дуговой сварке трубопроводов в данных условиях выглядит следующим образом:

$$PC_3 = П(2,4) + Ш(2,9) + Н(2,1) + Фш(2,4) + Пр(1,6). \quad (5)$$

Таблица 3. Структура дефектности, выявленная по причинам «прихватка» и «зачистка» при РДС стыков трубопроводов

Table 3. The structure of defectiveness revealed after the “tack” and “preweld cleaning” reasons under the pipelines joints manual arc welding conditions

Марка стали	Диаметр, мм	Толщина, мм	Сварено стыков, шт.	Забраковано, шт./%	Типы дефектов и их количество									
					П		Ш		Н		Фш		Пр	
					всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.
09Г2	57	2,5	230	64/28	485	2,1	644	2,8	345	1,5	390	1,7	345	1,5
20Х	89	4,0	310	115/37	715	2,3	837	2,7	560	1,8	710	2,3	500	1,6
14ХГС	112	6,0	420	181/43	1050	2,5	1260	3,0	925	2,2	1050	2,5	670	1,6
20Х	289	10,0	370	211/57	1920	2,6	2220	3,0	1850	2,5	1920	2,6	1260	1,7
14ХГС	500	14,0	340	218/64	4420	2,6	4930	2,9	4420	2,6	4590	2,7	2720	1,6
Итого			1670	789/46	8590	2,4	9891	2,9	8100	2,1	8660	2,4	5495	1,6

Общая структура дефектности, образующаяся по причинам фактора «Подготовка и сборка» при ручной дуговой сварке, представлена на рис. 2. Дефекты формы шва формируются, как правило, из-за смещения стыков в результате нарушения технологии постановки прихваток, а также неудовлетворительной зачистки шва и околошовной зоны.

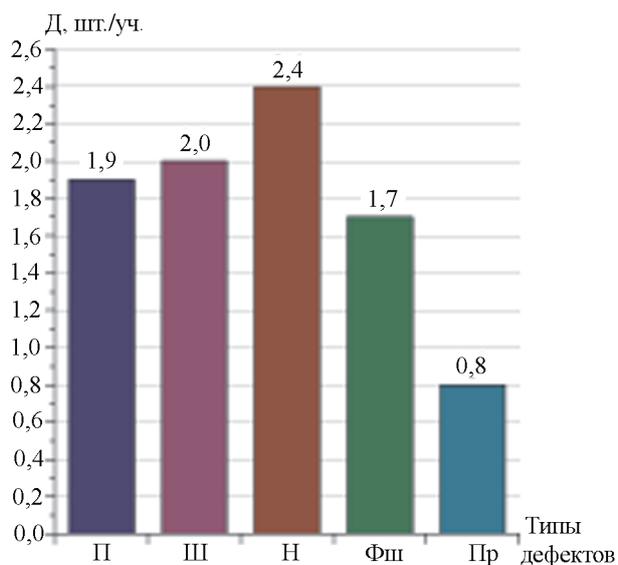


Рис. 2. Пример получения статистической информации о дефектности сварных соединений по причинам фактора «Подготовка и сборка под сварку»

Fig. 2. The structure of defectiveness formed for the reasons of the “fit-up and preparation” factor under the pipelines joints manual arc welding

непровары, а частота и количество пор, шлаковых включений, дефектов формы шва и прочих дефектов незначительны независимо от типоразмеров сварных соединений. Структура образующейся дефектности при изготовлении сварных соединений механизированной сваркой в среде защитных газов по причине некачественной подготовки кромок выглядит следующим образом:

$$ПС_1 = П(0,8) + Ш(0,8) + Н(1,7) + Фш(0,5) + Пр(0,7). \quad (6)$$

Т а б л и ц а 4. Структура дефектности, выявленная по причине «подготовка кромок» при механизированной сварке стыков трубопроводов в среде защитных газов

Table 4. The structure of defectiveness revealed after the “edge preparation” reason under the mechanized welding of pipelines joints by gas-shielded welding

Марка стали	Диаметр, мм	Толщина, мм	Сварено стыков, шт.	Забраковано, шт./%	Типы дефектов и их количество									
					П		Ш		Н		Фш		Пр	
					всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.
14ХГС	89	4,0	850	342/40	790	0,9	640	0,8	1180	1,4	410	0,5	530	0,6
09Г2	89	4,0	730	308/42	620	0,8	560	0,8	940	1,3	330	0,5	490	0,7
14ХГС	112	6,0	1180	648/55	860	0,7	930	0,8	1930	1,6	510	0,4	670	0,6
20Х	289	10,0	970	559/58	1560	0,8	1750	0,9	3880	2,0	770	0,4	1350	0,7
14ХГС	500	14,0	480	307/64	2160	0,9	1920	0,8	5760	2,4	1680	0,7	1920	0,8
Итого			4210	2164/52	5990	0,8	5800	0,8	13690	1,7	3700	0,5	4960	0,7

Структура дефектности, полученная при механизированной сварке в защитных газах, позволяет сравнить ее с представленной выражением (3) структурой дефектности, полученной при ручной дуговой сварке при одном и том же отрицательном факторном параметре и идентичных условиях сборочно-сварочных работ. Видно, что количество непроваров, дефектов формы шва и прочих дефектов практически одинаково. Однако количество пор и шлаковых включений уменьшилось практически в 2 раза, что еще раз подтверждает преимущество механизированных способов сварки над ручной дуговой. В табл. 5 представлены результаты изготовления сварных соединений стыков трубопроводов механизированной сваркой в среде защитных газов при отрицательных факторных параметрах «зазор» и «соосность». Видно, что в структуре образую-

щейся дефектности преобладают непровары – от 2,3 до 3,4, а также различные дефекты формы шва – от 1,5 до 2,5 на участке контроля.

Показательно, что с увеличением диаметров трубопроводов растет и количество этих дефектов. Частота и количество пор, шлаковых включений и прочих дефектов меняются незначительно и практически не зависят от типоразмеров сварных соединений. Этот факт свидетельствует о стабильности технологических процессов формирования сварных соединений, не связанных с исследуемыми факторными параметрами «зазор» и «соосность». Структура образующейся дефектности при изготовлении сварных соединений механизированной сваркой в среде защитных газов по причинам «зазор» и «соосность» при механизированной сварке в защитных газах стыков трубопроводов выглядит следующим образом:

$$PC_2 = П(1,3) + Ш(1,4) + Н(2,7) + Фш(1,9) + Пр(1,3). \quad (7)$$

Таблица 5. Структура дефектности, выявленная по причинам «зазор» и «соосность» при механизированной сварке в защитных газах стыков трубопроводов

Table 5. The structure of defectiveness revealed after the “flashing gap” and “alignment” reasons under the mechanized welding of pipelines joints by gas-shielded welding

Марка стали	Диаметр, мм	Толщина, мм	Сварено стыков, шт.	Забраковано, шт./%	Типы дефектов и их количество									
					П		Ш		Н		Фш		Пр	
					всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.
14ХГС	89	4,0	850	440/52	1020	1,2	1105	1,3	1955	2,3	1275	1,5	1020	1,2
09Г2	89	4,0	730	393/54	950	1,3	1095	1,5	1750	2,4	1170	1,6	880	1,2
14ХГС	112	6,0	1180	672/57	1530	1,3	1650	1,4	3070	2,6	2120	1,8	1530	1,3
20Х	289	10,0	970	611/63	2910	1,5	2900	1,5	5820	3,0	4270	2,2	2910	1,5
14ХГС	500	14,0	480	307/67	3360	1,4	3370	1,4	8160	3,4	6000	2,5	3360	1,4
Итого			4210	2423/59	9770	1,3	10120	1,4	20755	2,7	14835	1,9	9700	1,3

В табл. 6 представлены результаты изготовления сварных соединений стыков трубопроводов механизированной сваркой в среде защитных газов при отрицательных факторных параметрах «прихватка» и «зачистка». Видно, что в структуре образующейся дефектности в данном случае преобладают поры и шлаковые включения, в среднем по 2,7 на участке контроля. Их количество стабильно высокое и меняется незначительно с увеличением типоразмеров трубопроводов.

Количество непроваров, дефектов формы шва и прочих дефектов при изготовлении сварных соединений представленных типоразмеров сравнительно невысокое и постоянное. Этот факт подтверждает стабильность технологических процессов сборочно-сварочных работ, не связанных с нарушением нормативных параметров постановки прихватки и зачистки.

Таким образом, структура образующейся дефектности при изготовлении сварных соединений стыков трубопроводов механизированной сваркой в среде защитных газов по причинам отрицательных факторных параметров «прихватка» и «зачистка» выглядит следующим образом:

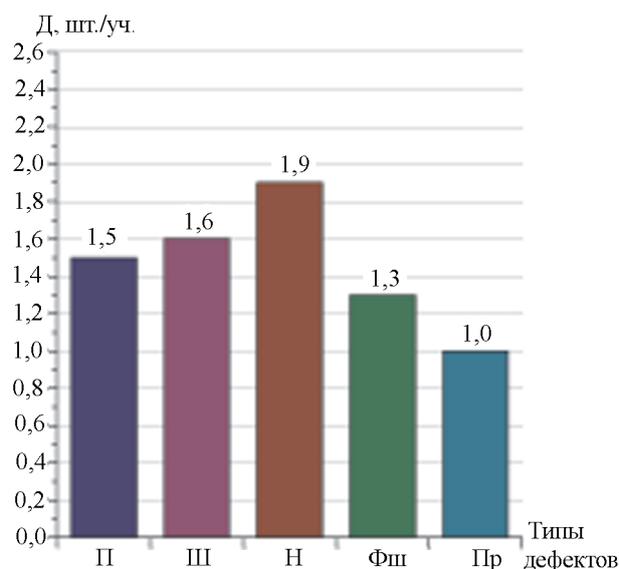


Рис. 3. Общая структура дефектности, образующаяся по причинам фактора «Подготовка и сборка под сварку» при механизированной сварке

Fig. 3. The general structure of defectiveness, formed for the reasons of the “fit-up and preparation for welding” factor under the mechanized welding

$$PC_3 = П(2,7) + Ш(2,7) + Н(1,7) + Фш(1,9) + Пр(1,3). \quad (8)$$

Диаграмма структуры дефектности, образующейся по причинам фактора «Подготовка и сборка» при механизированной сварке, представлена на рис. 3.

Таблица 6. Структура дефектности, выявленная по причинам «прихватка» и «зачистка» при механизированной сварке в защитных газах стыков трубопроводов (процесс разлажен)

Table 6. The structure of defectiveness revealed after the “tack” and “pre-weld cleaning” reasons under the mechanized welding of pipelines joints by gas-shielded welding

Марка стали	Диаметр, мм	Толщина, мм	Сварено стыков, шт.	Забраковано, шт./%	Типы дефектов и их количество									
					П		Ш		Н		Фш		Пр	
					всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.
14ХГС	89	4,0	320	109/34	736	2,3	800	2,5	480	1,5	575	1,8	384	1,2
09Г2	89	4,0	410	143/35	984	2,4	1025	2,5	615	1,5	780	1,9	530	1,3
14ХГС	112	6,0	730	300/41	1900	2,6	1910	2,6	1240	1,7	1315	1,8	876	1,2
20Х	289	10,0	450	202/45	2700	3,0	2790	3,1	1710	1,9	1710	1,9	1170	1,3
14ХГС	500	14,0	270	133/49	4185	3,1	4050	3,0	2430	1,8	2700	2,0	1890	1,4
Итого			2180	887/41	10505	2,7	10575	2,7	6475	1,7	7080	1,9	4850	1,3

По сравнению с ручной дуговой сваркой при изготовлении сварных соединений в аналогичных условиях (структура дефектности представлена выражением (5)) заметно снизилась частота и количество непроваров, дефектов формы шва и прочих дефектов – в среднем на 20 %. Однако частота и количество пор и шлаковых включений на участке контроля практически одинаковы при разных способах сварки. Этот важный факт подтверждает установленную ранее статистическую связь структуры образующейся дефектности с ее причинами. В данном случае главными причинами являются прихватка и зачистка. Таким образом, по структуре образующейся дефектности с высокой долей вероятности определяется не только доминирующий производственный фактор (подготовка и сборка), но и его отрицательные параметры.

Из табл. 6 видно, что в общей структуре преобладают дефекты – поры и их скопления и в такой же степени шлаковые включения – по 2,7 на участке контроля. Этот факт свидетельствует о наличии в сварном шве и околошовной зоне остатков ржавчины, окалины, заусенец, масел и других включений. Большое количество дефектов формы шва – 1,9 на участке контроля, а также непроваров, в основном по кромке и между слоями – 1,7 на участке контроля – вызвано нарушением технологии постановки прихваток.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований технологических процессов формирования сварных соединений подтверждены ранее полученные данные статистического анализа дефектности и установлено, что каждый отрицательный параметр фактора подготовки и сборки под сварку является причиной только ему присущей структуры образующейся дефект-

Таблица 7. Дефектность, выявленная по причинам фактора «Подготовка и сборка под сварку» при разлаженном технологическом процессе

Table 7. The defectiveness revealed after “fit-up and preparation for welding” factor reasons under disarranged technological process conditions

Способ сварки	Сварено стыков, шт.	Забраковано, шт./%	Выявлено дефектов, шт.				
			Поры и их скопления, всего/шт. уч.	Шлаковые включения, всего/шт. уч.	Непровары, всего/шт. уч.	Дефекты формы шва, всего/шт. уч.	Прочие, всего/шт. уч.
РДС	9930	4900/52	24235/1,9	26406/2,1	27905/2,3	18825/1,7	11540/1,0
МП + CO ₂	2180	887/41	10505/2,7	10575/2,7	6475/1,7	7080/1,9	4850/1,3
МП+CO ₂ +Ar	4210	2423/59	9770/1,3	10120/1,4	20755/2,7	14835/1,9	9700/1,3
РАДС	4210	2164/52	5990/0,8	5800/0,8	13690/1,7	3700/0,5	4960/0,7
Итого	20530	10374/51	50500/1,7	52501/1,8	68825/2,1	44440/1,5	31050/1,1

ности. Также установлено, что в общей структуре дефектности по причинам фактора «Подготовка и сборка» преобладают дефекты типа «непровар» – 2,1 на участок контроля, шлаковые включения, поры и их скопления, а также различные дефекты формы шва (табл. 7, рис. 4). Согласно назначению и ответственности данных объектов принят 100%-й объем контроля. В случае, когда стык бракуется, он подлежит повторному контролю неразрушающими методами. Видно, что причины, указанные в табл. 7, генерируют от 82,1 до 94,0 % образующихся дефектов. Так, если при сварке труб малых диаметров дефектность образуется в основном из-за плохой зачистки шва, околошовной зоны и подготовки кромок, то на больших диаметрах она образуется, как правило, из-за несоблюдения нормативных требований по установке необходимого зазора и соосности между свариваемыми элементами.

Полученные данные также позволяют определить общий удельный вес влияния фактора на уровень качества сварных соединений конкретных типоразмеров в разрезе способов сварки, марок свариваемых материалов и условий сварочного процесса (табл. 8).

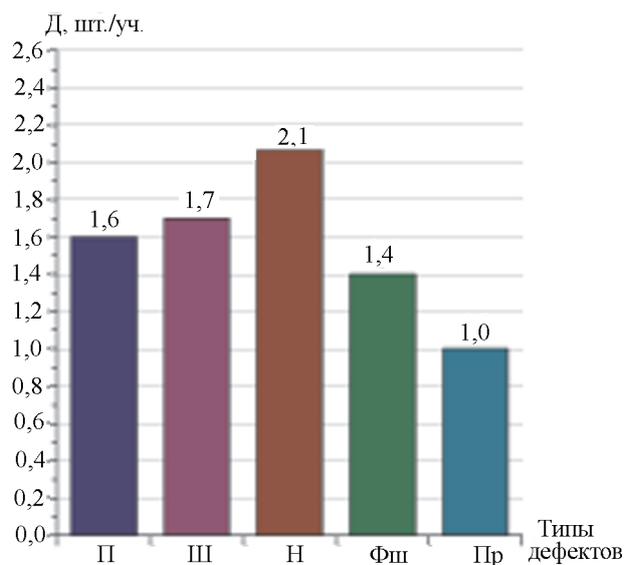


Рис. 4. Общая структура дефектности, образующаяся по причинам фактора «Подготовка и сборка» при сварке стыков трубопроводов

Fig. 4. The general structure of defectiveness, formed for the reasons of the “fit-up and preparation” factor under the pipelines joints welding

Таблица 8. Влияние подготовки и сборки под сварку на формирование бездефектных сварных соединений технологических трубопроводов

Table 8. The influence of fit-up and preparation for welding on technological pipelines faultless welded connections formation

Способ сварки	Диаметр трубопровода, мм	Толщина стали, мм	Марка стали	Сварено стыков, шт.	Забраковано стыков, всего, шт.	Уровень качества, %	Забраковано стыков по фактору, всего, шт.	Удельный вес фактора, %
РДС	57	2,5	09Г2	1250	61	95,1	11	18,0
МП + CO ₂	89	4,0	20Х	1270	73	94,3	18	24,6
РАДС	89	4,0	14ХГС	5740	360	93,7	84	23,3
МП + CO ₂ + Ar	112	6,0	20Х	4300	290	93,3	73	25,3
РДС	112	6,0	14ХГС	2790	215	92,3	64	29,7
РАДС	289	10,0	14ХГС	2900	235	91,9	74	31,5
РДС	289	10,0	20Х	1500	132	91,2	44	33,2
РДС	500	14,0	14ХГС	1790	167	90,7	57	34,1
Итого				21540	1533	92,7	425	27,7

Вывод. Установлено, что при механизированной сварке в защитных газах по сравнению с ручной дуговой сваркой при изготовлении сварных соединений в одинаковых условиях снизилась в среднем на 20 % частота и количество всех типов дефектов, что еще раз подтверждает преимущество механизированных способов сварки над ручными.

Удельный вес фактора «Подготовка и сборка» в формировании бездефектных сварных соединений последовательно возрастает с увеличением диаметров трубопроводов независимо от способов сварки. Так, при сварке трубопроводов диаметром 57 мм удельный вес фактора составляет 18 %, а при сварке трубопроводов диаметром 500 мм – 34,1 %. Такая закономерность, во-первых, объясняется тем, что с увеличением диаметров трубопроводов увеличивается и толщина стенок, сварка, как правило, осуществляется за несколько проходов, причем каждый слой зачищается и выполняется контроль его качества. Во-вторых, значительно возрастает сложность

соблюдения нормативных требований по установке зазора и соосности. Так, при изготовлении сварных соединений магистральных трубопроводов диаметром более 1220 мм трудоемкость подготовки и сборки под сварку составляет, по разным оценкам, от 65 до 75 % всего технологического процесса. В результате экспериментальных исследований технологических процессов формирования сварных соединений подтверждены ранее полученные данные статистического анализа дефектности и установлено, что отрицательные параметры фактора подготовки и сборки под сварку являются причиной образования присущей только этому фактору структуры дефектности.

Таким образом, определены причинно-следственные связи и закономерности формирования бездефектных сварных соединений по фактору «Подготовка и сборка под сварку», позволяющие принимать обоснованные управляющие решения по предупреждению образования дефектности и совершенствованию технологических процессов сборочно-сварочных работ.

Список использованных источников

1. Занковец, П. В. Математическое моделирование влияния производственных факторов на образование дефектов сварных соединений / П. В. Занковец, В. К. Шелег // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах : сб. тр. 2-й Междунар. конф. – Киев: ИЭС имени Е. О. Патона НАН Украины, 2004. – С. 95–98.
2. Совершенствование технологических процессов и оптимизация качества сборочно-сварочных работ / П. В. Занковец [и др.]. – Минск: Право и экономика, 2004. – 343 с.
3. Занковец, П. В. Разработка методов и исследование причин дефектности сварных соединений / П. В. Занковец, Г. Н. Здор, В. К. Шелег // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2006. – № 2. – С. 107–113.
4. Занковец, П. В. Математическое моделирование и информационные технологии в обеспечении качества сварных металлоконструкций / П. В. Занковец // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2007. – № 2. – С. 120–128.
5. Занковец, П. В. Оптимизация качества и конкурентоспособности сварочной продукции на основе математического моделирования причинно-следственных связей образования дефектов сварных соединений / П. В. Занковец // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах : сб. тр. 4-й Междунар. конф. – Киев: ИЭС имени Е. О. Патона НАН Украины, 2009. – С. 17–22.
6. Занковец, П. В. Использование математического моделирования для исследования влияния сварочных материалов на качество сварных соединений трубопроводов / П. В. Занковец // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2010. – № 4. – С. 24–27.
7. Занковец, П. В. Исследование влияния подготовки и сборки под сварку на уровень качества сварных соединений технологических трубопроводов / П. В. Занковец // Автоматическая сварка. – 2011. – № 6. – С. 48–53.
8. Занковец, П. В. Основы формирования бездефектных сварных соединений в условиях мелкосерийного и единичного сборочно-сварочного производства / П. В. Занковец // Сварка и родственные технологии : сб. докладов Междунар. симп. – Минск, 2012. – С. 49–54.
9. Занковец, П. В. Информационно-аналитические системы в обеспечении качества сварочных работ / П. В. Занковец // Эффективная сварка: качество, безопасность, ресурсосбережение : сб. докл. III межотрасл. науч.-практ. конф. – Минск, 2016. – С. 143–149.
10. Занковец, П. В. Исследование влияния доминирующих производственных факторов на качество сварных соединений / П. В. Занковец // Инженерия поверхностей, новые порошковые композиционные материалы, сварка : сб. докл. Междунар. симп. – Минск, 2009. – С. 297–304.
11. Занковец, П. В. Исследование влияния доминирующих производственных факторов на качество сварных соединений / П. В. Занковец // Инженерия поверхностей, новые порошковые композиционные материалы, сварка : сб. докл. Междунар. симп. – Минск, 2009. – С. 297–304.
12. Занковец, П. В. Управление качеством сварочных работ и сварных соединений по алгоритму «Дефект – Причина – Фактор» / П. В. Занковец // Эффективная сварка: качество, безопасность, ресурсосбережение : сб. докл. респ. конф.-семинара. – Минск, 2014. – С. 51–57.
13. Фомихина, И. В. Исследование влияния режимов сварки и дефектности сварных соединений сосудов для хранения масла и нефти, находящихся под давлением, на склонность к деформационному старению / И. В. Фомихина, П. В. Занковец, Ю. О. Лисовская // Сварка и родственные технологии. – 2008. – № 10. – С. 112–116.
14. Занковец, П. В. Математическое моделирование и автоматизация технологической подготовки производства сварных конструкций / П. В. Занковец, В. К. Шелег // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 5–15.
15. Занковец, П. В. Исследование закономерностей образования дефектности сварных соединений в условиях единичного и мелкосерийного сварочного производства / П. В. Занковец // Порошковая металлургия. – 2016. – № 39. – С. 129–141.

References

1. Zankovets P.V., Sheleg V.K. Mathematical simulation of production factors influence on defects formation in welded connections. *Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii v svarke i rodstvennykh protsessakh : sbornik trudov 2-i Mezhdunarodnoi konferentsii* [Mathematical simulation and information technologies in welding and related processes, Collected papers of 2nd International Conference]. Kiev, Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2004, pp. 95–98. (In Russian).

2. Zankovets P.V., Sheleg V.K., Denisov L.S., Berbasova N.Yu., Pavlyuk S.K. *Upgrading of the technological processes and quality optimisation in assembly welding works*. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2004. 343 p. (In Russian).
3. Zankovets P.V., Zdor G.N., Sheleg V.K. Working out the methods and investigating the reasons of welded connections unsoundness. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2006, no. 2, pp. 107–113. (In Russian).
4. Zankovets P.V. Mathematical simulation and information technologies in quality assurance for welded assemblies. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2007, no. 2, pp. 120–128. (In Russian).
5. Zankovets P.V. Quality and competitiveness optimization for welding production on the basis of mathematical simulation for cause-and-effect relations in formation of defects of welded connections. *Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii v svarka i rodstvennykh protsessakh : sbornik trudov 4-i Mezhdunarodnoi konferentsii* [Mathematical simulation and information technologies in welding and related processes: collected papers of 4th International Conference]. Kiev, Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2009, pp. 17–22. (In Russian).
6. Zankovets P.V. Use of mathematical simulation for investigating the influence of welding materials on quality of the pipelines welded connections. *Truboprovodnyi transport: teoriya i praktika* [Pipeline Transport: Theory and Practices], 2010, no. 4, pp. 24–27. (In Russian).
7. Zankovets P.V. Investigating the influence of preparation and assemblage for welding on a quality level of technological pipelines welded connections. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic Welding], 2011, no. 6, pp. 48–53. (In Russian).
8. Zankovets P.V. Fundamental of faultless welded connections formation in the conditions of small-scale and individual assembly welding production. *Svarka i rodstvennye tekhnologii : sbornik dokladov Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Welding and related technologies: the collection of reports of the International Symposium], Minsk, 2012, pp. 49–54. (In Russian).
9. Zankovets P.V. Information and analytical systems in quality insurance for welding works. *Effektivnaya svarka: kachestvo, bezopasnost', resursosberezhenie : sbornik dokladov III mezhotraslevoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Effective welding: quality, safety, resource-saving: Proceedings of IIIrd Interindustry Scientifically-Practical Conference]. Minsk, 2016, pp. 143–149. (In Russian).
10. Zankovets P.V. Investigating the influence of dominating production factors on the welded connections quality. *Inzheneriya poverkhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy, svarka : sbornik dokladov Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Engineering of the surfaces, new composite powder materials, welding: collection of the International symposium reports], Minsk, 2009, pp. 297–304. (In Russian).
11. Zankovets P.V. Investigating the influence of dominating production factors on the welded connections quality. *Inzheneriya poverkhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy, svarka : sbornik dokladov Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Engineering of the surfaces, new composite powder materials, welding: collection of the International symposium reports], Minsk, 2009, pp. 65–66. (In Russian).
12. Zankovets P.V. Welding and welded connections quality management after “Defect – Reason – Factor” algorithm. *Effektivnaya svarka: kachestvo, bezopasnost', resursosberezhenie : sbornik dokladov respublikanskoi konferentsii-seminara* [Effective welding: quality, safety, resource-saving: the collection of the Republican conference-seminar reports], Minsk, 2014, pp. 51–57. (In Russian).
13. Fomikhina I.V., Zankovets P.V., Lisovskaya Yu.O. Investigating the influence of welding modes and welded connections defectiveness in vessels for mineral oil and petroleum storage, being under pressure, upon propensity to strain ageing. *Svarka i rodstvennye tekhnologii* [Welding and Allied Technologies], 2008, no. 10, pp. 112–116. (In Russian).
14. Zankovets P.V., Sheleg V.K. Mathematical simulation and automation of process engineering for welded structure production *Nauka i tekhnika* [Science and Technique], 2017, vol. 16, no. 1, pp. 5–15. Doi: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-5-15. (In Russian).
15. Zankovets P.V. Investigating the laws of defectiveness formation in welded connections under the conditions of individual and small-scale welding fabrication. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder Metallurgy], 2016, no. 39, pp. 129–141. (In Russian).

Информация об авторе

Занковец Павел Васильевич – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: p.zankovets@mail.ru

Information on author

Zankovets Pavel Vasilievich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: p.zankovets@mail.ru

Для цитирования

Занковец, П. В. Закономерности влияния технологического процесса подготовки и сборки под сварку на формирование бездефектных сварных соединений / П. В. Занковец // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 59–69.

For citing

Zankovets P.V. Regularities of weld preparation and fit-up technological process influence on faultless of welded connections formation. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 59–60. (In Russian).

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

УДК 539.3

Поступила в редакцию 29.10.2015
Received 29.10.2015

В. А. Томило¹, Е. В. Кочик², А. С. Кравчук³, И. А. Тарасюк³

¹*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

²*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*

³*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

**ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ПЛОСКИХ ПРУЖИН
С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ХАРАКТЕРА
ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ***

На основе использования макросов для программы конечноэлементного анализа ANSYS 10 ED / LS-DYNA разработана методика оптимизации геометрии системы последовательно соединенных плоских пружин, используемых в качестве упругих элементов катапульты, предназначенной для запуска беспилотных летательных аппаратов. Критерием оптимизации геометрии в данном случае является условие наибольшего хода обеих плоских пружин с наименьшим отклонением от симметричных форм относительно средин пружин.

Произведена редукция динамической оптимизационной задачи сжатия и расслабления системы плоских пружин к квазистатической задаче предварительного сжатия системы и высокоскоростной динамической задачи ее расслабления, что позволило существенно сократить время решения оптимизационной задачи. Решение первой части задачи производилось Implicit-решателем ANSYS 10 ED, и по его результатам было получено решение второй части задачи Explicit-решателем ANSYS 10 ED / LS-DYNA.

Исходя из полученных результатов, оптимальной с точки зрения величин хода и отклонений от симметрии плоских пружин переменного профиля является система, состоящая из одинаковых рессор, симметричных относительно середины профиля.

Ключевые слова: линейно-деформируемый материал, метод конечных элементов, оптимизация, плоская пружина, эллиптическая рессора.

V.A. Tomilo¹, Y.V. Kochyk², A.S. Kravchuk³, I.A. Tarasiuk³

¹*Physical and Technical Institute of the National Academy of Sciences, Minsk, Belarus*

²*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

³*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

**OPTIMIZATION OF FLAT SPRING GEOMETRY WITH CONSIDERING DESIGN FEATURES
AND NATURE OF DYNAMIC LOADING**

A geometry optimization method based on use of macros for finite-element analysis program ANSYS 10 ED / LS-DYNA was developed for system of series-connected flat springs used as elastic elements of catapult for launching unmanned aerial vehicles. Optimization criterion in this case is the condition of the maximum stroke of both flat springs with the minimum deviation from the symmetrical form with respect to spring midpoints.

Dynamic optimization problem of compression and relaxation of flat spring system was reduced to quasi-static problem of system pre-compression and high-velocity dynamic problem of its relaxation, and it significantly reduced solution time. Solution to the first part of the problem was carried out by means of Implicit Solver of ANSYS 10 ED / LS-DYNA. Solution to the second part of the problem was obtained by means of Explicit Solver of ANSYS 10 ED / LS-DYNA based on previous part results.

It was determined that optimum system in terms of stroke and deviations of symmetry of flat springs consists of identical springs which are symmetrical relative to section middles.

Keywords: linearly deformable material, finite-element method, optimization, flat spring, elliptical leaf spring.

* Исследования выполнены на демонстрационной версии ANSYS 10 ED / LS-DYNA, распространявшейся бесплатно на территории стран СНГ.

Введение. Одним из важнейших направлений в современной авиации является разработка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для выполнения широкого спектра задач не только в военной, но и в гражданской сфере. Обычно конструктивно двигатели БПЛА эффективны только при достижении аппаратом некоторой начальной скорости, что влечет за собой необходимость создания технических средств обеспечения указанной скорости при запуске.

Для взлета малоразмерных БПЛА широко используются устройства типа катапульты на основе упругих элементов, поскольку устройства запуска такого типа просты, предоставляют достаточную мобильность и практически бесшумны в сравнении с устройствами, использующими энергию взрыва твердого топлива или пневмоцилиндры.

В качестве упругих элементов устройств запуска БПЛА типа катапульты могут, в частности, использоваться плоские пружины типа эллиптических рессор ввиду отсутствия недостатков, присущих резиновым и полимерным накопителям энергии и связанных с релаксационными и гистерезисными явлениями.

Исходя из эксплуатационного режима, плоские пружины изготавливают из листов переменной толщины. Целью данного исследования является разработка методики оптимизации систем из последовательно соединенных плоских пружин типа рессор на основе использования макросов для ANSYS 10 ED / LS-DYNA. Предварительные исследования методом конечных элементов с использованием твердотельных элементов показали, что отклонения утолщения от середины рессоры могут быть значительными и зависят от критериев, по которым производятся вычисления. В данной работе использовать критерий симметричности рессор при высокоскоростном расслаблении является второстепенным, так как в силу особенностей конструкции устройства запуска БПЛА необходимо, чтобы оба упругих элемента обеспечивали максимально возможный ход незакрепленных концов.

Геометрические характеристики плоских пружин. Распространенным профилем плоских пружин переменной толщины является синусоидальный профиль [1], нижняя грань которого представляет собой дугу окружности радиуса R_0 (рис. 1). Профиль имеет переменную толщину

$$h(s) = h_{\max} - e \left(1 - \sin \left(\frac{\pi s}{l + 2dh} \right) \right), \quad s \in [0, l],$$

которая определяется по нормали к нижней грани.

Здесь h_{\max} – максимальная толщина профиля, e – эксцентриситет прокатного вала, dh – положение h_{\max} относительно середины нижней грани профиля, $l = R_0 (\pi - 2 \arccos (L/R_0))$ – длина нижней грани профиля, где L – полудлина проекции изогнутой нижней грани профиля, h_0 – прогиб центральной части нижней грани профиля, $R_0 = \frac{h_0^2 + L^2}{2h_0}$ – радиус кривизны нижней грани профиля.

Постановка и решение задачи динамического нагружения системы из последовательно соединенных плоских пружин. Система из двух рессор, соединенных последовательно подвижным шарниром, подвергается сжатию с постоянной скоростью v_0 , соответствующей квазистатическому процессу (рис. 2). Левый край первой рессоры имеет неподвижное шарнирное закрепление, правый край второй рессоры может свободно перемещаться вдоль оси Ox и на момент окончания процесса сжатия смещается на расстояние u_x . Для запуска БПЛА снимается нагрузка с предварительно сжатой системы, происходит распрямление рессор со скоростью v , зависящей от массы груза на ее свободном конце.

При расчетах предполагалось, что материал рессоры – сталь с модулем Юнга $E = 2,1 \times 10^{11}$ Па, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,27$ и плотностью $\rho = 7865$ кг/м³. Рессора имеет следующие геометрические характеристики: $h_{\max} = 0,008$ м, $e = 0,004$ м, $L = 0,36$ м, $h_0 = 0,015$ м, $th = 0,062$ м – ширина рессоры. Перемещение правого конца второй рессоры $u_x = 0,2$ м.

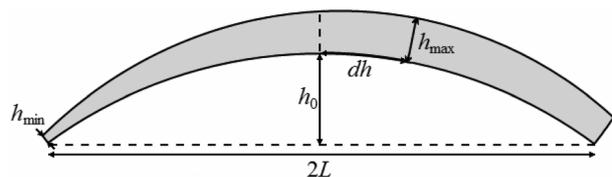


Рис. 1. Профиль рессоры переменной толщины
Fig. 1. Section of a flat spring of a variable thickness

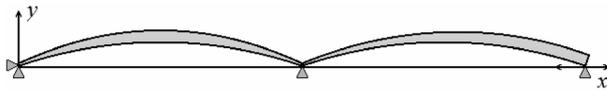


Рис. 2. Схема нагружения системы последовательно соединенных рессор

Fig. 2. Loading scheme of the system of series-connected flat springs

Поскольку шаг интегрирования в ANSYS 10 ED / LS-DYNA для балочных элементов равен $\Delta t_\varepsilon = l_\varepsilon / c$, где l_ε – размер элемента, $c = \sqrt{E/\rho}$ – скорость распространения продольных волн в упругом стержне, время решения поставленной задачи с учетом предварительного квазистатического сжатия системы неоправданно велико. Для уменьшения времени интегрирования следует разбить исходную задачу на две: квазистатическую задачу, решение которой производится с помощью неявного метода (implicit), и динамическую, которая решается с помощью явного метода (explicit). Поскольку поставленная задача представляет собой решения большого количества однотипных задач, различающихся лишь величинами dh_1 , dh_2 и v , то для автоматизации процесса были написаны макросы, использующие в качестве аргументов ARG1, ARG2 и ARG3 эти параметры.

При моделировании процесса предварительного нагружения системы с помощью ANSYS 10 ED использовались балочные элементы BEAM188 с расположением узлов на нижних гранях рессор. Для моделирования подвижного шарнира, соединяющего плоские пружины, записывалось дополнительное граничное условие, связывающее перемещения по оси Ox узлов на соответствующих краях рессор. Ввиду нелинейности задачи решение производилось с включенной опцией Large Displacement Static, а его результаты записывались в файл.

При моделировании процесса высокоскоростного расслабления системы с помощью ANSYS 10 ED / LS-DYNA использовались балочные элементы BEAM161 с расположением узлов на нижних гранях рессор. Решение, полученное для квазистатического процесса, использовалось как начальное состояние системы [2–4]. Моделирование подвижного шарнира, соединяющего плоские пружины, осуществлялось аналогично квазистатической задаче. Для каждого шага интегрирования определялись максимальные отклонения $\varepsilon_{1,\max}$ и $\varepsilon_{2,\max}$ от симметричных форм рессор с записью результата в файл.

Анализ результатов. В силу особенностей конструкции устройства запуска БПЛА необходимо, чтобы оба упругих элемента обеспечивали максимально возможный ход незакрепленных концов с допустимым расхождением в ходе рессор в 10%. Данное условие выполняется в случае использовании одинаковых рессор $dh_1 = dh_2 \in [0, l/2]$, а также при всевозможных положениях dh_1 и dh_2 , лежащих в промежутке $[0, 0.3 \times l/2]$ (рис. 3).

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что зависимости отклонений от симметрии рессор $\varepsilon_{1,\max}$ и $\varepsilon_{2,\max}$ при постоянных значениях скорости распрямления v и одного из параметров dh_1 и dh_2 имеют практически линейный характер.

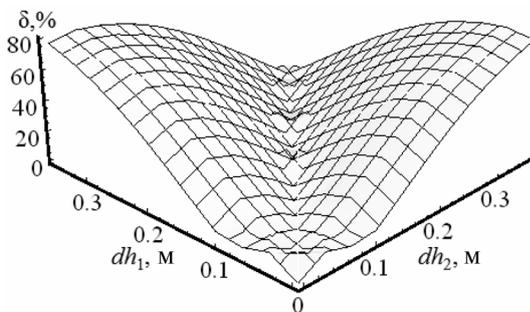


Рис. 3. Зависимость расхождения хода рессор δ от dh_1 и dh_2

Fig. 3. Dependence of stroke difference of flat springs δ from dh_1 and dh_2

Поставленная задача по оптимизации профиля переменной толщины была решена методом конечных элементов с помощью программных систем ANSYS 10 ED / LS-DYNA. Исходя из характера задачи, использовалась упругая изотропная модель материала рессоры. При построении сетки модели использовались балочные элементы.

Наименьшие отклонения от симметрии первой рессоры $\varepsilon_{1,\max}$ соответствуют наибольшему значению положения утолщения второй рессоры dh_2 и достигают минимума при $dh_1 = 0$ и $dh_2 = l/2$, однако в этом случае значения отклонения второй рессоры $\varepsilon_{2,\max}$ принимают наибольшие значения (рис. 4, 5).

На рис. 4 и 5 представлены зависимости максимальных отклонений от симметрии $\varepsilon_{1,\max}$ и $\varepsilon_{2,\max}$ от положения dh_1 при расслаблении системы со скоростью $v = 80$ м/с: 1 – при $dh_2 = 0$; 2 – при $dh_2 = 0,3 \times l/2$; 3 – при $dh_2 = 0,6 \times l/2$; 4 – при $dh_2 = l/2$.

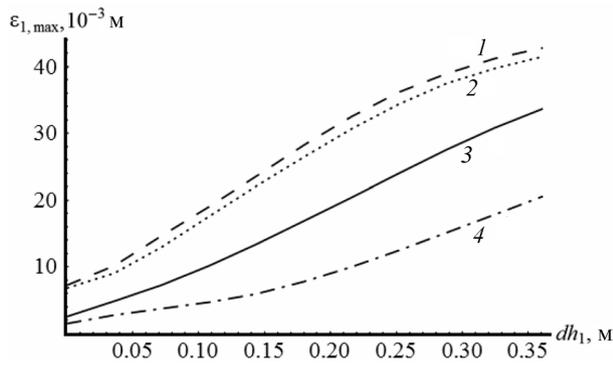


Рис. 4. Зависимости $\varepsilon_{1,\max}$ от dh_1

Fig. 4. Dependencies of $\varepsilon_{1,\max}$ from dh_1

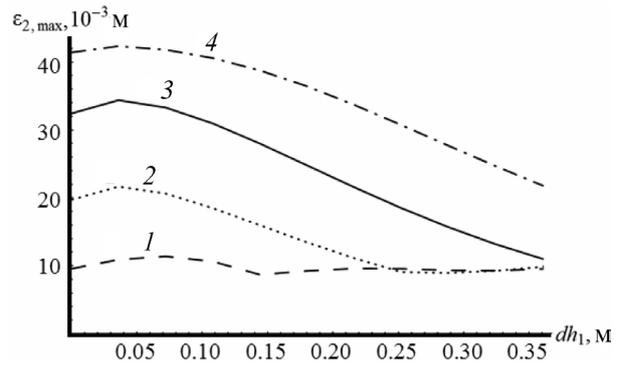


Рис. 5. Зависимости $\varepsilon_{2,\max}$ от dh_1

Fig. 5. Dependencies of $\varepsilon_{2,\max}$ from dh_1

Аналогичная зависимость наблюдается в значениях отклонения от симметрии второй рессоры $\varepsilon_{2,\max}$. Наименьшие отклонения $\varepsilon_{2,\max}$ соответствуют наибольшему значению положения утолщения первой рессоры dh_1 , однако в этом случае значения отклонения первой рессоры $\varepsilon_{1,\max}$ принимают наибольшие значения (рис. 6, 7).

На рис. 6 и 7 представлены зависимости максимальных отклонений от симметрии $\varepsilon_{1,\max}$ и $\varepsilon_{2,\max}$ от положения dh_2 при расслаблении системы со скоростью $v = 80$ м/с: 1 – при $dh_1 = 0$; 2 – при $dh_1 = 0,3 \times l/2$; 3 – при $dh_1 = 0,6 \times l/2$; 4 – при $dh_1 = l/2$.

Сравнивая значения отклонений от симметрии рессор $\varepsilon_{1,\max}$ и $\varepsilon_{2,\max}$ при различных положениях dh_1 и dh_2 , можно прийти к выводу, что оптимальная система должна состоять из одинаковых, симметричных относительно середины профиля рессор.

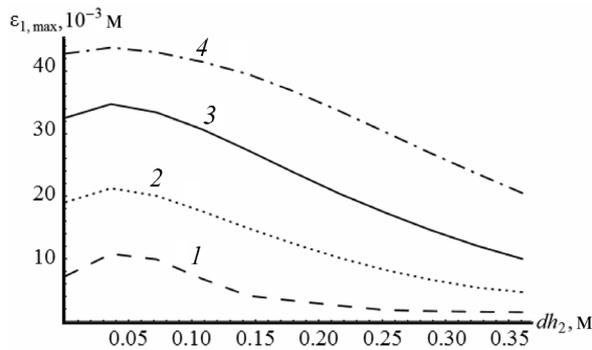


Рис. 6. Зависимости $\varepsilon_{1,\max}$ от dh_2

Fig. 6. Dependencies of $\varepsilon_{1,\max}$ from dh_2

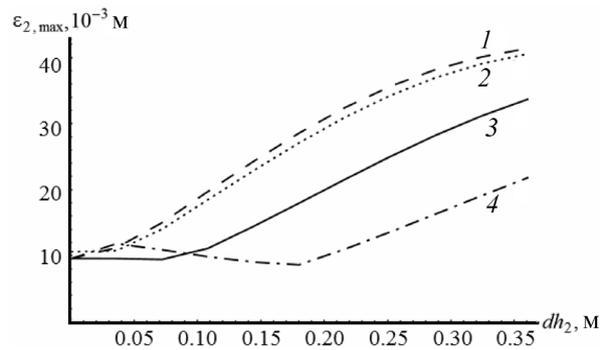


Рис. 7. Зависимости $\varepsilon_{2,\max}$ от dh_2

Fig. 7. Dependencies of $\varepsilon_{2,\max}$ from dh_2

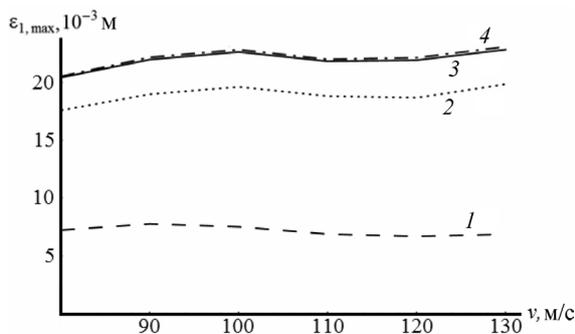


Рис. 8. Зависимости $\varepsilon_{1,\max}$ от v

Fig. 8. Dependencies of $\varepsilon_{1,\max}$ from v

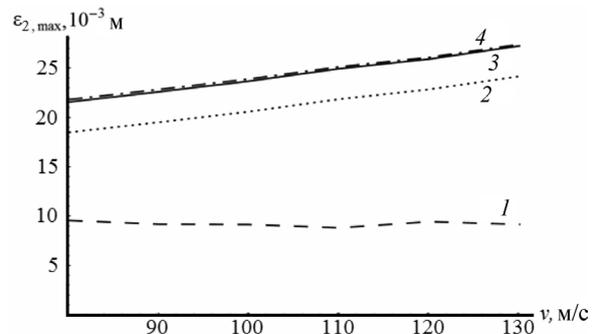


Рис. 9. Зависимости $\varepsilon_{2,\max}$ от v

Fig. 9. Dependencies of $\varepsilon_{2,\max}$ from v

Отметим, что зависимости отклонений $\varepsilon_{1,\max}$ и $\varepsilon_{2,\max}$ от скорости распрямления v при различных dh_1 и dh_2 с достаточной для практики точностью можно рассматривать как линейные (рис. 8, 9).

На рис. 8 и 9 представлены зависимости максимальных отклонений от симметрии $\varepsilon_{1,\max}$ и $\varepsilon_{2,\max}$ от скорости расслабления системы v : 1 – при $dh_1 = dh_2 = 0$; 2 – при $dh_1 = dh_2 = 0,3 \times l/2$; 3 – при $dh_1 = dh_2 = 0,6 \times l/2$; 4 – при $dh_1 = dh_2 = l/2$.

Сравнивая значения отклонений от симметрии рессор $\varepsilon_{1,\max}$ и $\varepsilon_{2,\max}$ при различных значениях скорости распрямления v , можно прийти к выводу, что оптимальная система должна состоять из одинаковых, симметричных относительно середины профиля рессор.

Выводы. Разработана методика оптимизации геометрии системы последовательно соединенных плоских пружин типа рессор, используемых в качестве упругих элементов катапульты, предназначенной для запуска БПЛА. Данная методика основана на использовании макросов для программы конечно-элементного анализа ANSYS 10 ED / LS-DYNA.

Особенностью данной методики является то, что критерием построения оптимального решения в данном случае является условие наибольшего хода обеих плоских пружин при наименьшем отклонении от симметрии относительно середин профиля рессор.

Динамическая задача сжатия и расслабления системы упругих элементов была сведена к двум задачам: квазистатического сжатия системы рессор, решение которой производилось неявным методом, и высокоскоростной динамической задаче расслабления системы рессор, которая решалась явным методом на основе результатов предыдущей задачи, что позволило существенно сократить время решения задачи оптимизации.

Исходя из полученных результатов, оптимальной с точки зрения величин хода и отклонений от симметрии плоских пружин переменного профиля является система, состоящая из одинаковых рессор, симметричных относительно середины профиля.

Список использованных источников

1. Клубович, В. В. Технологии изготовления и обработки специальных периодических профилей / В. В. Клубович, В. А. Томило. – Минск: БНТУ, 2007. – 298 с.
2. Кравчук, А. С. Электронная библиотека механики и физики: лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST с примерами решения задач : в 3 ч. [Электронный ресурс] / А. С. Кравчук, А. И. Кравчук. – Минск: БГУ, 2013. – Ч. 1: ANSYS/LS-DYNA. Общая характеристика интерфейса и средств создания твердотельной модели детали. Использование моделей материалов и типов конечных элементов LS-DYNA. – Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/44277> – Дата доступа: 01.10.2015.
3. Кравчук, А. С. Электронная библиотека механики и физики: лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST с примерами решения задач : в 3 ч. [Электронный ресурс] / А. С. Кравчук, А. И. Кравчук. – Минск: БГУ, 2013. – Ч. 2: Ограничения и нагрузки в ANSYS/LS-DYNA. Решение поставленных задач и просмотр результатов решения в ANSYS/LS-DYNA. – Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/44280> – Дата доступа: 01.10.2015.
4. Кравчук, А. С. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST с примерами решения задач : в 3 ч. [Электронный ресурс] / А. С. Кравчук, А. С. Чашинский, А. И. Кравчук. – Минск: БГУ, 2013. – Ч. 3: Основные элементы графического интерфейса LS-PREPOST. – Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/44281> – Дата доступа: 01.10.2015.

References

1. Klubovich V.V., Tomilo V.A. Technologies of manufacturing and processing of special periodic sections. Minsk, BNTU, 2007, 298 p. (In Russian).
2. Kravchuk A.S., Kravchuk A.I. Digital library of mechanics and physics. Lectures on ANSYS/LS-DYNA and LS-PREPOST basics with examples of problem-solving. In 3 part. Part 1. General characteristics of interface and tools for creation of solid model of a detail. Using materials and types of finite elements models of LS-DYNA. Minsk, Belarusian State University, 2013. Available at: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/44277> (date of access: 01 October 2015). (In Russian).
3. Kravchuk A.S., Kravchuk A.I. Digital library of mechanics and physics. Lectures on ANSYS/LS-DYNA and LS-PREPOST basics with examples of problem-solving. In 3 part. Part 2. Restrictions and loadings in ANSYS/LS-DYNA. Solving assigned problems and viewing solution results in ANSYS/LS-DYNA. Minsk, Belarusian State University, 2013. Available at: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/44280> (date of access: 01 October 2015). (In Russian).
4. Kravchuk A.S., Kravchuk A.I., Chashinskiy A.S. Digital library of mechanics and physics. Lectures on ANSYS/LS-DYNA and LS-PREPOST basics with examples of problem-solving. In 3 parts. Part 3. General elements of LS-PREPOST interface. Minsk, Belarusian State University, 2013. Available at: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/44281> (date of access: 01 October 2015). (In Russian).

Информация об авторах

Томило Вячеслав Анатольевич – доктор технических наук, доцент, начальник научно-исследовательского центра деформационных и литейных технологий, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: stamila@rambler.ru

Кочик Евгения Вячеславовна – преподаватель кафедры сопротивления материалов машиностроительного профиля, машиностроительный факультет Белорусского национального технического университета (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zhenjatomilo@gmail.com

Кравчук Александр Степанович – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры био- и наномеханики, механико-математический факультет Белорусского государственного университета (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ask_belarus@inbox.ru

Тарасюк Иван Александрович – аспирант кафедры био- и наномеханики, механико-математический факультет Белорусского государственного университета (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ivan.a.tarasyuk@gmail.com

Для цитирования

Оптимизация геометрии плоских пружин с учетом конструктивных особенностей и характера динамического нагружения / В. А. Томило [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 70–75.

Information about the authors

Tomilo Viacheslav Anatol'evich – D. Sc. (Engineering), Assistant Professor, Head of the Deformation and Casting Technologies Research Center, Physical and Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: stamila@rambler.ru

Kochyk Yevheniya Viacheslavovna – Lecturer of the Mechanical Engineering Profile Materials Resistance Department, Machine Engineering Faculty of the Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zhenjatomilo@gmail.com

Kravchuk Alexander Stepanovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Professor of the Bio- and Nanomechanics Department, Mechanical and Mathematical Faculty of the Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ask_belarus@inbox.ru

Tarasiuk Ivan Alexandrovich – postgraduate-student of the Bio- and Nanomechanics Department, Mechanical and Mathematical Faculty of the Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ivan.a.tarasyuk@gmail.com

For citation

Tomilo V.A., Kochyk Y.V., Kravchuk A.S., Tarasiuk I.A. Optimization of flat spring geometry with considering design features and nature of dynamic loading. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 70–75. (In Russian).

Л. М. Акулович¹, Д. Б. Ермашкевич²

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь

²Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «ЛАКШМИ», Минск, Беларусь

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСКРОЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПРОФИЛЬНОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА

Показана роль автоматизации технологической подготовки производства в обеспечении конкурентоспособности продукции машиностроения.

При изготовлении машиностроительной продукции определяющим в части снижения себестоимости является уменьшение расхода материалов прежде всего в заготовительном производстве (заготовки деталей машин должны иметь минимальные припуски для последующей механической обработки). Уменьшить расход металла можно также за счет максимального использования деловых отходов металлопроката. Технологические возможности современного оборудования термической резки листового материала значительно расширились. Опыт работы машиностроительных предприятий, эксплуатирующих оборудование для резки листа в комплекте со специализированными системами автоматизированного раскроя, которые привязаны к этому оборудованию, показывает, что при использовании автоматизированных систем раскроя коэффициент использования металла может быть увеличен в среднем на 22...28 %.

Анализ предлагаемых на рынке систем автоматизированного проектирования раскроя листового материала показывает, что указанные программные средства в целом соответствуют современному научно-техническому уровню разработок данного типа. Вместе с тем отмечены и некоторые их недостатки.

Рассмотрены особенности программного комплекса «Модуль раскроя». Описаны методики автоматизации технологии раскроя деталей из профильного металлопроката, расчета норм расхода материала и коэффициента его использования. Приведены алгоритмы линейной, прямоугольной и фигурной раскладки, реализованные в указанном программном комплексе.

Ключевые слова: раскрой металлопроката, маршрут резки, зона термического влияния, деловые отходы металлопроката, машина термической резки, карта раскроя, управляющая программа, сквозной технологический процесс.

L.M. Akulovich¹, D.B. Yermashkevich²

¹Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus

²“LAKSHMI” Scientific and Production Ltd. Co, Minsk, Belarus

AUTOMATION OF CUTTING OF BLANKS FROM PROFILED ROLLED METAL

The role of automation of technological preparation of production to ensure the competitiveness of engineering products. At manufacturing of engineering products the determining factor of cost reduction is to reduce material consumption, primarily in the blank production (billets of machine parts need to have minimal allowances for further machining). The Maximum use of business waste metal can also reduce the consumption of metal. The technological possibilities of modern equipment for nesting has increased considerably. Experience of machine-building enterprises, which use equipment for cutting sheets, including specialized computer-aided manufacturing (CAM) for nesting, which fit the equipment, proves, that the utilization ratio of metal can be increased in average by 22...28 % when the specialized CAM for nesting is using.

Analysis of specialized CAM for nesting, available on the market, shows that these software tools generally correspond to the modern scientific-technical level of developments of this type. However, they have some drawbacks.

The peculiarities of software package “Module nesting” are considered. The methods of automation technology cutting of parts made of profile rolled metal, calculation of norms of material consumption and utilization are described. Algorithms of linear, rectangular shaped layouts, which are implemented in the software package “Module nesting” are shown.

Keywords: cutting of metal, cutting the route, zone of thermal influence, business waste of metal, thermal cutting machine, card cutting, NC-program, thought technological process.

Введение. Изделия машиностроительных отраслей (автотракторостроение, сельхозмашиностроение, станкостроение) характеризуются многообразием по функциональному назначению, технологической сложностью, высокой металло- и трудоемкостью. Внедрение конкурентоспо-

собных технологий, обеспечивающих высокое качество и минимальную себестоимость продукции, неизбежно приводит к увеличению удельного веса работ по технологической подготовке производства и, как следствие, к необходимости ее автоматизации с целью снижения затрат и сокращения сроков освоения новых изделий [1–3].

При изготовлении машиностроительной продукции определяющим в части снижения себестоимости является уменьшение расхода материалов прежде всего в заготовительном производстве (заготовки деталей машин должны иметь минимальные припуски для последующей механической обработки). Уменьшить расход металла можно также за счет максимального использования деловых отходов металлопроката.

Структура производств машиностроительных предприятий отличается по составу имеющихся технологических переделов, однако типичными для всех предприятий являются: раскрой листового проката (на гильотинных ножницах, машинах термической резки, лазерных установках), раскрой круглого и профильного металлопроката (на ленточно-отрезных, абразивно-отрезных, фрезерно-отрезных станках), холодная штамповка, термическая и механическая обработка, лакокрасочные и гальванические покрытия, сборка. В таких производствах для решения задач технологической подготовки наиболее эффективным является компьютеризация проектирования технологических процессов [1, 4].

Вместе с тем для повышения срока службы ответственных деталей за последние годы созданы и внедряются в производство новые технологии термического упрочнения, плазменного и лазерного легирования, обеспечивающие формирование наноструктурированных поверхностных слоев высокой твердости. Технологические возможности современного оборудования термической резки листового материала значительно расширились, что позволяет во многих случаях производить окончательную обработку отверстий, проемов и сложных контуров деталей с обеспечением заданных чертежом требований точности и шероховатости поверхностей. Например, установки для лазерной и плазменной резки заготовок из листа обеспечивают точность позиционирования по осям $\pm 0,01$ мм, а погрешность вырезаемых контуров составляет $\pm 0,1$ мм. Высокая производительность резки (до 20 м/мин), малые ширина реза и зона термического влияния (диаметр луча составляет сотые доли миллиметра), высокая точность позиционирования, обеспечивающая адекватную точность взаимного расположения вырезаемых контуров заготовки, возможность раскроя сложных контуров деталей из листового материала, отсутствие механического воздействия на обрабатываемый материал дают возможность использовать способы термической резки взамен некоторых операций механической обработки в единых технологических процессах. Все это обуславливает создание систем автоматизированного проектирования (САПР) сквозных технологических процессов изготовления деталей машин, позволяющих разрабатывать как единые технологические процессы изготовления деталей, так и управляющие программы для оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ).

Типовая структура машиностроительного производства в зависимости от серийности и объема выпускаемой продукции предусматривает организацию отдельно расположенного заготовительного цеха (участка), где производится раскрой металлопроката, черновая механическая обработка, холодная штамповка с выполнением отдельных предварительных операций механической обработки в заготовительном производстве. Доля трудоемкости производства заготовок на таких предприятиях составляет около 30 % от общей трудоемкости изготовления изделий.

В зависимости от формы заготовок различают задачи линейного, прямоугольного и фигурного раскроя. При раскрое листового проката для заготовок деталей прямоугольной формы, как правило, используют гильотинные ножницы, для деталей произвольной формы – машины термической резки или установки лазерной резки, а для круглого и профильного проката – разрезные станки (ленточно-, абразивно- и фрезерно-отрезные). При этом основным критерием рациональности служит максимальное использование исходного материала и минимизация отходов с учетом возможности их последующего использования. Опыт работы предприятий показывает, что отходы листового проката при ручной раскладке могут достигать до 30 %. Обобщенным параметром определения эффективности раскроя является коэффициент использования металла (КИМ), равный отношению суммы масс вырезанных заготовок деталей к массе исходного про-

ката. Очевидно, что основным путем повышения КИМ является автоматизация раскладки [5], которая позволяет в достаточно короткий срок перебрать большое количество вариантов с одновременным определением КИМ и из них выделить наиболее оптимальный с последующим редактированием (при необходимости) в интерактивном режиме.

Опыт работы машиностроительных предприятий, эксплуатирующих оборудование для резки листа в комплекте со специализированными системами автоматизированного раскроя, которые привязаны к этому оборудованию, показывает, что при использовании автоматизированных систем раскроя КИМ может быть увеличен в среднем на 22...28 %.

В области автоматизации раскроя металла известны локальные программные комплексы в основном для раскроя деталей произвольной формы на машинах термической резки (МТР) с ЧПУ, настройки к графическим пакетам для автоматического или ручного размещения контуров деталей на листах материала, а также специализированные программные комплексы, которые поставляются заказчиком совместно с машинами лазерной и плазменной резки. Прослеживается тенденция поставки из западных стран машин для резки металла совместно с программным обеспечением для раскладки деталей и подготовки управляющих программ для этих машин. Это программное обеспечение является узкоспециализированным для конкретных машин резки металла, и их отдельная поставка фирмами-производителями не производится. У некоторых производителей графических систем имеются настройки с математическим и программным аппаратом для размещения деталей на листе, которые могут быть поставлены только с их графическими пакетами.

Анализ предлагаемых на рынке САПР раскроя листового материала показывает, что указанные программные средства в целом соответствуют современному научно-техническому уровню разработок данного типа. Вместе с тем следует отметить следующие их недостатки:

большинство САПР не решают задачи раскладки и раскроя прямоугольных деталей на гильотинных ножницах, а также раскроя круглого и профильного проката на разрезных станках; не учитываются изменяющиеся условия заготовительных производств;

программное обеспечение не обеспечивает формирования сквозного технологического процесса с операциями механической обработки, штамповки и т. д.;

некоторые САПР ориентированы на использование графических пакетов других фирм производителей, причем стоимость графических пакетов превышает стоимость самих САПР во много раз;

узкоспециализированные САПР ориентированы только на конкретные машины резки.

Материалы и методы исследования. Многие из указанных недостатков нашли решение в программном комплексе автоматизированного раскроя деталей из профильного металлопроката «Модуль раскроя» (рис. 1). В частности, решены задачи расчета рациональных размеров деловых отходов при раскрое, их учета и использования в последующих раскладках. Существенным отличием «Модуля раскроя» от других систем является также наличие модуля раскладки деталей для резки на отрезных станках, полностью автоматическое формирование технологической документации, отсутствие жесткой привязки к используемому технологическому оборудованию.

Основные функции «Модуля раскроя»:

формирование и ведение архива изделий, узлов и деталей с поддержкой структуры изделия; формирование и ведение баз данных материалов и сортиментов профильного металлопроката, в том числе отходов с автоматическим обновлением по результатам раскроя;

формирование заказов на раскрой;

оптимальная (рациональная) автоматизированная раскладка в автоматическом и интерактивном режимах деталей с учетом особенностей технологии раскроя произвольной формы на машинах термической резки, прямоугольной формы на гильотинных ножницах, линейного раскроя на отрезных станках;

учет и использование деловых отходов;

автоматизированный расчет КИМ и норм расхода материалов при построении схем раскладки;

автоматизированное формирование параметров траектории движения режущего элемента на машинах термической резки;

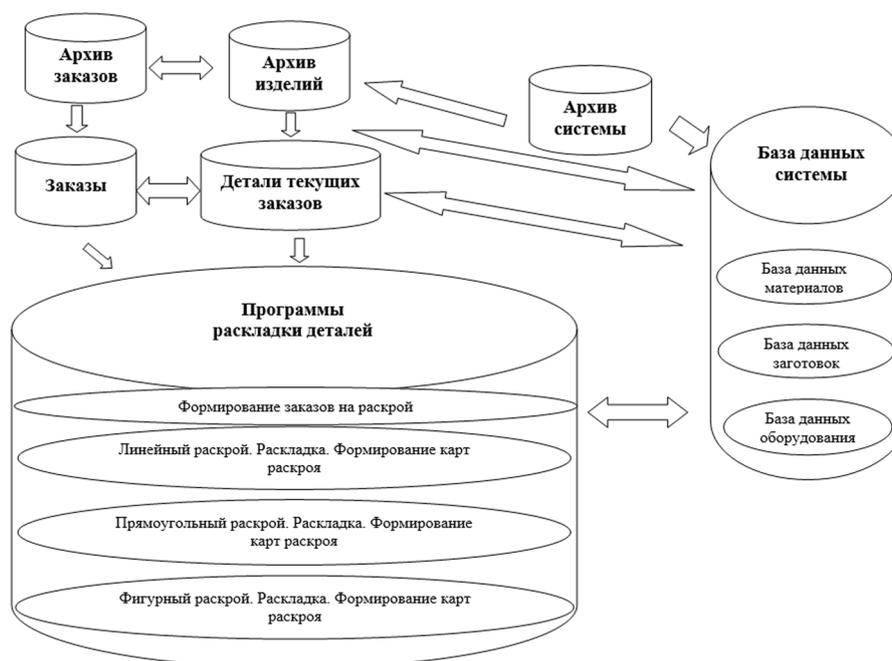


Рис. 1. Структурно-функциональная схема САПР «Модуль раскроя»

Fig. 1. Structural-functional scheme of CAM “Module nesting”

автоматизированное проектирование управляющих программ для устройств ЧПУ машин термической резки;

автоматизированное формирование выходных документов: карты раскроя, карты технологической информации и эскизов деталей;

формирование архива графических результатов раскладки по видам раскроя и показателей результатов раскладки;

возможность интеграции с информационными системами предприятий.

Основные компоненты «Модуля раскроя»:

архив изделий;

архив заказов;

база данных;

САПР раскроя деталей на машинах термической резки («Модуль фигурного раскроя»);

САПР раскроя деталей на гильотинных ножницах («Модуль прямоугольного раскроя»);

САПР раскроя деталей на отрезных станках («Модуль линейного раскроя»).

В системе «Модуль раскроя» использованы не только математические алгоритмы для оптимизации раскладки, но и эвристические методы раскладки (раскладка в одностипную полосу), учитывающие опыт технологов предприятий.

Линейная, прямоугольная и фигурная раскладки в «Модуле раскроя» выполняются по отдельным алгоритмам.

Линейная раскладка деталей осуществляется методом последовательно-одиночного размещения. При этом соблюдается принцип: от меньшего размера материала к большему и от большей детали к меньшей. То есть выбирается материал с минимальной длиной и проверяется, какая максимальная деталь может быть на нем разложена, затем после раскладки текущей детали на остатке выбирается следующая максимальная деталь, которая может быть разложена на остатке, и т. д. После автоматической раскладки предоставляется возможность пользователю скорректировать результаты раскладки в ручном режиме.

Указанная раскладка выполняется по методу последовательно-одиночного размещения. Сущность метода состоит в последовательном решении задач размещения очередного объекта относительно ранее установленных. В основе этого метода лежит естественный способ размеще-

ния всех геометрических объектов, устанавливая их по одному в области размещения с учетом условий взаимных непересечений с каждым ранее установленным объектом. При этом параметры размещения каждого устанавливаемого объекта выбираются так, чтобы оптимизировать некоторую функцию цели, адекватную функции цели основной задачи.

Метод носит приближенный характер и является детерминированным, то есть каждой последовательности перебора групп переменных соответствует одно решение.

Линейная раскладка выполняется по следующему алгоритму:

1. Выбираем материал с минимальными размерами:

$$\min(L_i), \text{ где } \forall_i = \overline{1, m}.$$

Устанавливаем длину материала с учетом расстояния от края материала RKL :

$$L_i = L_i - 2RKL.$$

2. Выбираем деталь с максимальным размером и с учетом припуска на деталь Pr_{ip_j} , укладываемую на этот материал:

$$l_j = \max(l_j + Pr_{ip_j}) \text{ при условии: } l_j < L_i, \forall_j = \overline{1, n}.$$

3. Определяем остаток материала $L_{\text{ост}}$:

$$L_{\text{ост}} = L_i - l_j.$$

4. Далее повторяем пункты 2–3 для $L_{\text{ост}}$. Если нет детали, укладываемой на остатке $L_{\text{ост}}$, то переходим к выбору следующего материала, то есть к пункту 1.

Прямоугольная и фигурная раскладки деталей выполняются по алгоритму, сущность которого состоит в следующем. Задан комплект, состоящий из n заготовок различных наименований, причем заготовок i -го наименования в него входит k_i штук, $i = 1, n$. Заготовки имеют сложную геометрическую форму с возможными внутренними вырезами. Имеется набор прямоугольных листов m типоразмеров, известно количество листов l_i каждого типоразмера. Необходимо заданный комплект заготовок разместить на листах из заданного ассортимента таким образом, чтобы коэффициент использования материала был максимальным. При этом должно выдерживаться минимально допустимое расстояние между заготовками. Необходимым условием решения этой задачи является то, что суммарное количество листов должно быть достаточным для размещения всех заготовок комплекта.

Представим заготовки в общем случае в виде многосвязных геометрических объектов S_i , границы которых заданы участками прямых и дуг окружностей. Для каждого объекта S_i определим его полюс Ω_i .

Пусть $K = \{S_i\}$, $i = 1, n$ – множество таких объектов. Каждому элементу этого множества соответствует число k_i , определяющее количество заготовок i -го типа в комплекте.

Пусть $S = \{S_i\}$, $i = 1, N$ – мультимножество, порожденное множеством K с показателями повторений k_i :

$$N = \sum_{i=1}^n k_i.$$

Множество S содержит столько элементов S_i множества K , сколько их определено показателем k_i .

Пусть $P = \{L_i\}$, $i = 1, m$ – множество типоразмеров листов. Каждому элементу этого множества соответствует число l_i , определяющее количество листов данного типоразмера.

Пусть $L = \{L_i\}$, $i = 1, M$ – мультимножество, порожденное множеством P с показателями повторений l_i :

$$M = \sum_{i=1}^m l_i.$$

Построить раскройный план – это значит, что каждой заготовке из множества S необходимо поставить в соответствие некоторый лист из множества L и определить ее местоположение на этом листе. Другими словами, определить отображение:

$$\frac{F}{S} \rightarrow UxL,$$

где $U = XY\Theta$ – пространство параметров размещения x, y, θ_i объектов $S, i = 1, N, L$ – множество прямоугольных областей размещения.

Отображение F , задающее размещение набора объектов на множестве областей, можно представить в виде суперпозиции двух отображений:

$$F = (f, z).$$

Отображение Z задает разбиение множества объектов S по областям $L, \frac{Z}{S} \rightarrow L$. Отображение f осуществляет размещение заготовок на листах, $\frac{f}{S} \rightarrow U$. Зададим отображение f вектором:

$$\vec{U} = (u_1, u_2, \dots, u_N),$$

где $u_i = (x_i, y_i, \theta_i)$ – параметры размещения объекта $S_i, i = 1, N$ в одной из областей множества L . Отображение Z зададим матрицей разбиения $\|Z\|$, элементы которой определяются следующим образом:

$$Z_{ij} = 1, \text{ если } S_i \in L_j;$$

$$Z_{ij} = 0, \text{ если } S_i \notin L_j,$$

и удовлетворяют условию:

$$\sum_{j=1} Z_{ij} = 1, i = 1, N. \tag{1}$$

Матрица $\|Z\|$ задает допустимое разбиение, если существует вектор \vec{U} , компоненты которого удовлетворяют условиям:

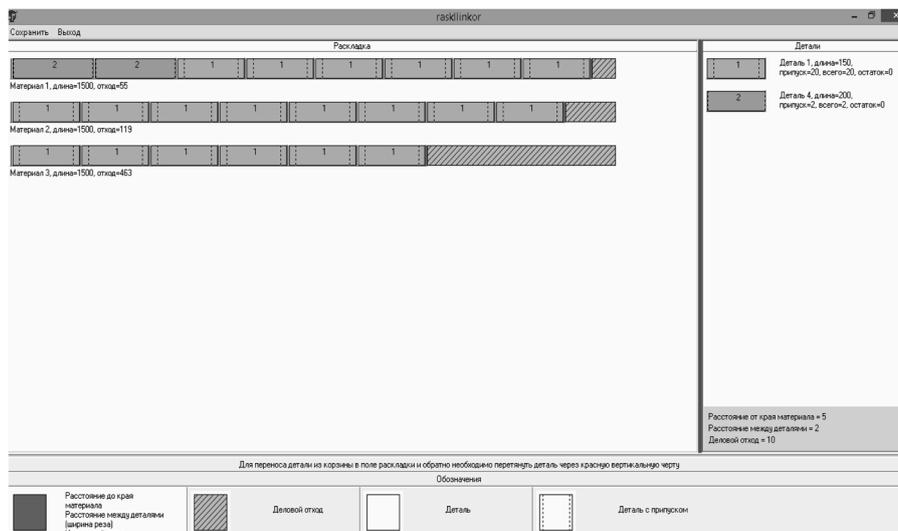


Рис. 2. Результат линейной раскладки в «Модуле линейного раскроя»

Fig. 2. The result of linear layout in the “Module of linear cutting”

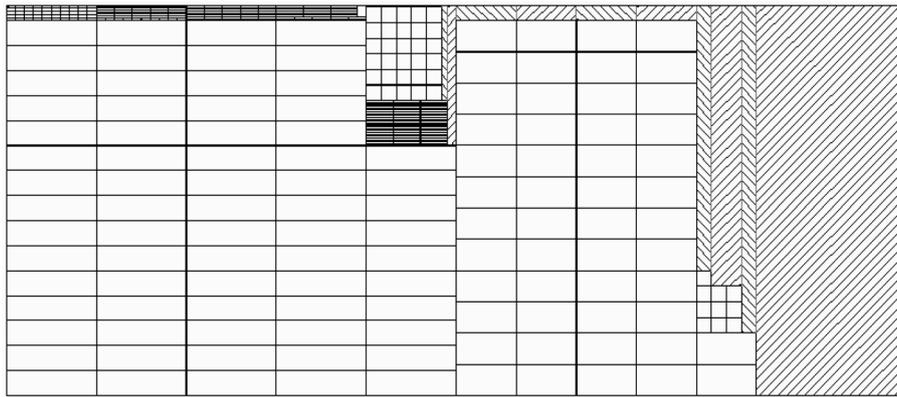


Рис. 3. Результат прямоугольной раскладки в «Модуле прямоугольного раскроя»
 Fig. 3. The result of rectangular layout in the “Module of rectangular cutting”

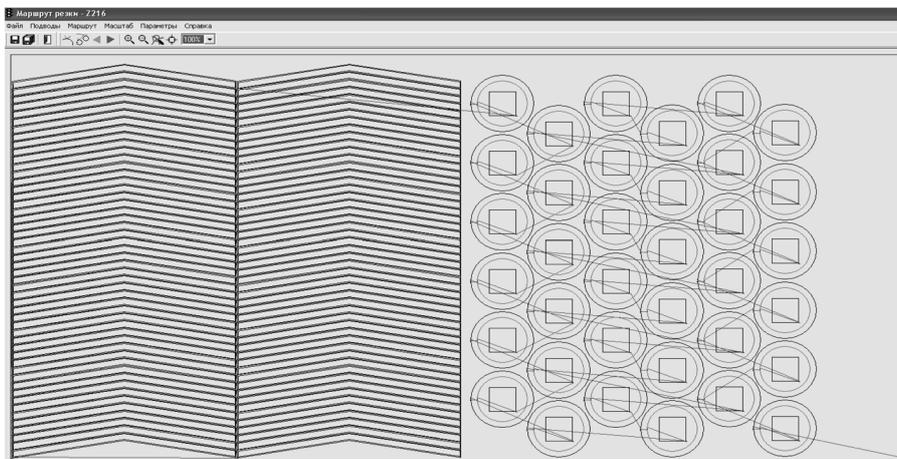


Рис. 4. Результат фигурной раскладки и построенный маршрут резки в «Модуле фигурного раскроя»
 Fig. 4. The result of shaped layout and built cutting path in the “True shape nesting module”

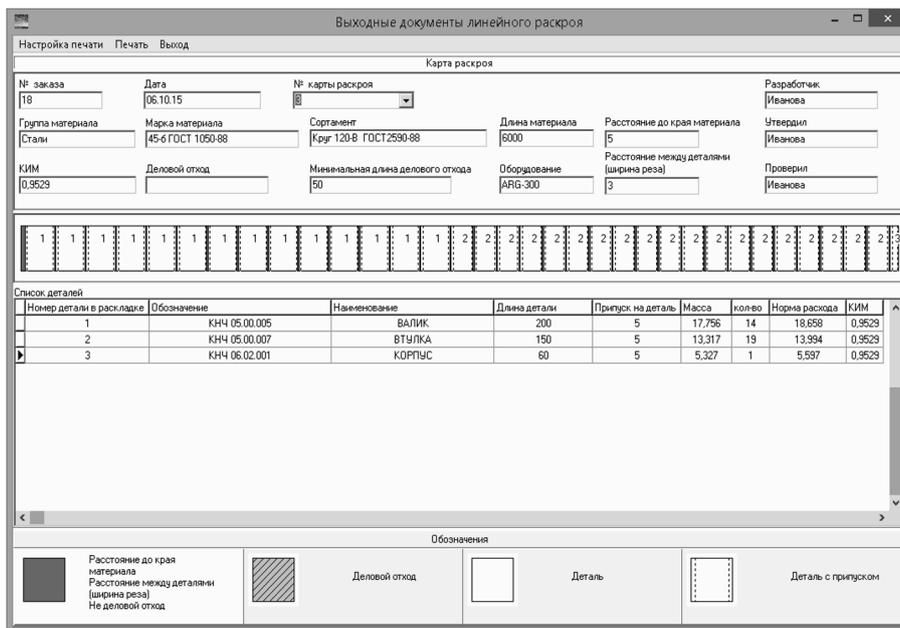


Рис. 5. Пример выходного документа (карта раскроя), спроектированного в программном комплексе «Модуль раскроя»
 Fig. 5. An example of the output document (card cutting), designed in software package “Module nesting”

$$\begin{aligned}
 S_i(u_i) \subset Lk \forall Z_{ik} = 1, i = 1, N, k = 1, M, \\
 \text{int } S_i(u_i) \cap \text{int } S_j(u_j) = \emptyset \forall Z_{ik} = 1, Z_{jk} = 1, \\
 i, j = 1, N, k = 1, M.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Условия (2) задают область \hat{U} допустимых значений вектора \vec{U} и являются необходимыми условиями размещения объектов.

Результаты и их обсуждение. Результат линейной раскладки в «Модуле линейного раскроя» приведен на рис. 2.

Результаты прямоугольной и фигурной раскладок в «Модуле прямоугольного раскроя» и «Модуле фигурного раскроя» представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

Пример выходного документа (карта раскроя), спроектированного в САПР «Модуль раскроя», приведен на рис. 5.

Заключение. Приведенные алгоритмы и методики реализованы в «Модуле раскроя», разработанном ОАО «Институт БЕЛОРГСТАНКИНПРОМ», который функционирует на ряде предприятий Республики Беларусь.

Экономический эффект от внедрения системы по сравнению с неавтоматизированным способом раскладки достигается за счет повышения коэффициента использования металла при автоматизированной раскладке на заготовке, в том числе за счет использования отходов; снижения трудоемкости раскладки деталей, а также подготовки управляющих программ для машин термической резки металла.

Благодарность

Авторы выражают благодарность М. М. Жадовичу за помощь при подготовке введения, Б. М. Штейн – за помощь в оформлении.

Acknowledgement

The authors are thankful to M.M. Jadovich for helping in preparing the Introduction, to B.M. Shtein for assistance in typography.

Список использованных источников

1. Аверченков, В. И. Автоматизация проектирования технологических процессов / В. И. Аверченков, Ю. М. Казаков. – Брянск: БГТУ, 2004. – 228 с.
2. Акулович, Л. М. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении / Л. М. Акулович, В. К. Шелег. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2012. – 488 с.
3. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования / И. П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 430 с.
4. Гиль, Н. И. Об одном алгоритме составления рациональных схем раскроя однотипных листов на многосвязные заготовки / Н. И. Гиль, В. М. Комяк, А. Б. Опанасюк // Теория и методы автоматизированного проектирования / ИТК АН БССР. – Минск, 1985. – Вып. 2. – С. 123–128.
5. Карташов, А. В. Одна реализация метода последовательно-одиночного размещения для решения задачи оптимального размещения кругов различных радиусов в полосе / А. В. Карташов, Н. В. Лученцова // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2007. – № 2. – С. 90–94.

References

1. Averchenkov V.I., Kazakov Yu.M. *Design automation of technological processes*. Bryansk, Bryansk State Technical University, 2004. 228 p. (In Russian).
2. Akulovich L.M., Sheleg V.K. *Fundamentals of the automated designing of technological processes in mechanical engineering*. Minsk, Novoe znanie Publ.; Moscow, INFRA-M Publ., 2012. 488 p. (In Russian).
3. Norenkov I.P. *Fundamentals of the automated designing*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2009, 430 p. (In Russian).
4. Gil' N.I., Komyak V.M. On one algorithm of drawing up of rational schemes of cutting the same type of sheets into multiply workpieces. *Teoriya i metody avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Theory and methods of computer-aided design], Minsk, Institute of Technical Cybernetics of the Academy of Sciences of the BSSR, 1985, iss. 2, pp. 123–128. (In Russian).
5. Kartashov A.V., Luchentsova N.V. One implementation of the method of series and single accommodation for the solution of the problem of optimal placement of circles of different radii in a band. *Radioelektronnyye i komp'yuternyye sistemy* [Radio Electronic and Computer Systems], 2007, no. 2, pp. 90–94. (In Russian).

Информация об авторах

Акулович Леонид Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология металлов», Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: leo-akulovich@yandex.ru

Ермашкевич Дмитрий Брониславович – заместитель директора, Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «ЛАКШМИ» (ул. Академика Купревича, 1, корп. 1, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mitrich31@mail.ru

Для цитирования

Акулович, Л. М. Автоматизация раскроя заготовок деталей из профильного металлопроката / Л. М. Акулович, Д. Б. Ермашкевич // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 76–84.

Information about the authors

Akulovich Leonid Mikhailovich – D. Sc. (Engineering), Professor at the Department of “Metal Technology”, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leo-akulovich@yandex.ru

Yermashkevich Dmitry Bronislavovich – Deputy Director, “LAKSHMI” Scientific and Production Ltd. Co (1/1, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mitrich31@mail.ru

For citation

Akulovich L.M., Yermashkevich D.B. Automation of cutting of blanks from profiled rolled metal. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnych navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 76–84. (In Russian).

В. С. Савенко¹, О. А. Троицкий², А. Г. Силивонец¹

¹*Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина, Мозырь, Беларусь*

²*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия*

ВКЛАД ПОНДЕРОМОТОРНЫХ ФАКТОРОВ В РЕАЛИЗАЦИЮ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Рассмотрены теоретические аспекты реализации электропластической деформации для динамического пинч-эффекта в упругой пластической деформации металлов с участием собственного магнитного поля тока. Перераспределение напряженности магнитного поля H в приповерхностных слоях металла обуславливает пондеромоторные явления в виде динамического пинч-эффекта, который помимо электронно-пластического действия импульсного тока приводит к сжатию образцов собственным магнитным полем и возбуждению упругих колебаний остова кристаллической решетки с частотой следования импульсов тока на фронте их нарастания. Динамический пинч-эффект создает ультразвуковую вибрацию решеточной системы, при этом изменяется кинетика и стимулируется пластическая деформация за счет увеличения амплитуды колебаний прямолинейных дислокаций и периодического изменения позиции дислокационных петель с увеличением вероятности отрыва дислокаций от стопоров. При деформации выше предела текучести за счет пинч-эффекта собственное магнитное поле тока диффундирует в кристалл, при этом скорость диффузии зависит как от проводимости металла, так и от частоты тока. При одной и той же геометрии образцов пинч-эффект выражен сильнее на материалах с высокой электропроводностью. Для практического использования технологии электропластической деформации, особенно при обработке металлов давлением при волочении, прокатке и так далее, необходимо учитывать физические условия создания пондеромоторных эффектов применительно к конкретным технически важным материалам.

Ключевые слова: электропластическая деформация, пондеромоторное действие тока, пинч-эффект, скин-эффект, собственное магнитное поле, вихревое электрическое поле, импульсный ток.

V.S. Savenko¹, O.A. Troickij², A.G. Silivonec¹

¹*I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University, Mozyr, Belarus*

²*A.A. Blagonravov Institute of Engineering of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

THE CONTRIBUTION OF PONDEROMOTIVE FACTORS IN IMPLEMENTATION OF ELECTROPLASTICITY DEFORMATION

Theoretical aspects of the implementation of electroplastic deformation for dynamic pinch-effect at elastic-plastic deformation of metals with the participation of self-magnetic field of current are considered. The redistribution of magnetic field intensity H in the surface layers of metal leads to ponderomotive effects in the form of dynamic pinch effect, which in addition to the electron-plastic action of the pulse current leads to a compression of the sample intrinsic magnetic field and the excitation of elastic vibrations of the skeleton of the crystal lattice, with a repetition frequency of current pulses at the front of their rise. Dynamic pinch effect creates ultrasonic vibration of the lattice system, thus changing the kinetics, and induced plastic deformation due to the increase of the oscillation amplitude of rectilinear dislocations and periodic changes of the position of the dislocation loops with a higher probability of detachment of dislocations from stoppers. At deformation above the yield limit, due to the pinch effect, magnetic field of a current diffuses into crystal, thus the rate of diffusion depends on the conductivity of the metal and the frequency of the current. At the same geometry of the samples, the pinch effect is stronger for materials with high electrical conductivity. For practical use of the technology of electroplastic deformation, especially in the processing of metals by pressure by drawing, rolling and so on, it is necessary to consider physical conditions of the creation of the ponderomotive effects in relation to particular technologically important materials.

Keywords: electroplastic deformation, the ponderomotive action of current, pinch effect, skin effect, magnetic field, vortex electric field, pulsed current.

Введение. Основные фундаментальные и прикладные направления развития современного физического материаловедения состоят в создании высокоинтенсивных технологий для получения материалов с комплексом высоких физико-механических свойств.

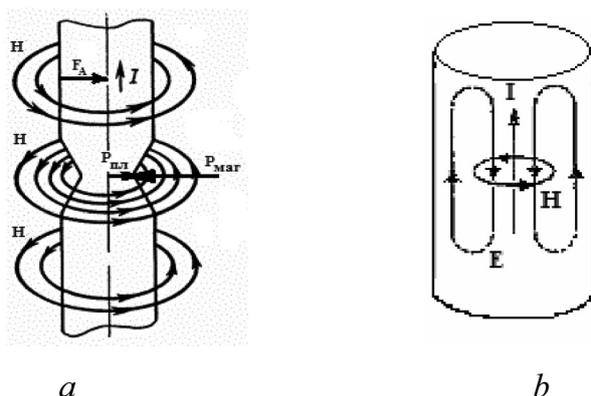


Рис. 1. Модель пондеромоторного пинч-действия импульсного тока (а) и вытеснение переменного тока на поверхности образца (b): H – магнитное поле тока, E – вызываемое вихревое электрическое поле

Fig. 1. A model of ponderomotive pinch action of pulse current (a) and an alternating current displacement on the sample surface (b): H – magnetic field of a current, E – induced vortex electric field

ных эффектов сжатием электронной плазмы магнитным полем, индуцированным протекающим током, при этом существенно изменяется кинетика пластической деформации.

В работе рассмотрены теоретические аспекты реализации электропластической деформации, с учетом пондеромоторных факторов, пинч-действия импульсного тока плотностью $J_m = 10^3$ А/мм², длительностью 10^{-4} с для динамического пинч-эффекта в упругой пластической деформации металлов с участием собственного магнитного поля тока (рис. 1).

Возбуждение электронной подсистемы металла, нагруженного выше предела текучести, короткими импульсами тока порядка $\tau \sim 10^{-4}$ с, обуславливает появление собственного магнитного поля в виде кольцевых линий вокруг электронной плазмы движущихся зарядов линий тока, смещая их к оси образца в поперечном направлении под действием поля Холла, силы Ампера (рис. 1, а). В результате перераспределение напряженности магнитного поля H в приповерхностных слоях металла обуславливает пондеромоторные явления в виде динамического пинч-эффекта, который помимо электронно-пластического действия импульсного тока приводит к сжатию образцов собственным магнитным полем и возбуждению в них упругих колебаний остова кристаллической решетки с частотой следования импульсов тока на фронте их нарастания. Динамический пинч-эффект создает ультразвуковую вибрацию решеточной системы, при этом изменяется кинетика и стимулируется пластическая деформация за счет увеличения амплитуды колебаний прямолинейных дислокаций и периодического изменения позиции дислокационных петель с увеличением вероятности отрыва дислокаций от стопоров [1–2, 5–8].

Рассмотрим пондеромоторные факторы, возникающие от собственного магнитного поля и электрического поля внутри проводника при реализации электропластической деформации.

Постоянное электрическое поле в проводнике существует только при наличии тока и поддерживается внешним источником электродвижущей силы. Из закона Фарадея $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$ следует, что источником электродвижущей силы служит изменяющийся магнитный поток, порождающий вихревое электрическое поле с возникновением токов Фуко, которые экранируют переменное магнитное поле так, что оно не проникает вглубь проводника (рис. 1, b). В то же время токи Фуко не могут экранировать статическое магнитное поле бесконечно с учетом омического сопротивления проводника. Как следствие, статическое магнитное поле свободно проникает вглубь проводника, причем чем быстрее изменяется магнитное поле, тем меньше глубина. В проводниках, у которых омические потери малы, уменьшение глубины проникновения поля становится заметным при умеренных частотах [3–5].

Решение этой задачи реализуется при электропластической деформации металлов в условиях возбуждения электронной подсистемы высокоэнергетическими воздействиями с целью программированного управления деформационными процессами для получения модифицированных свойств материалов с высокими служебными характеристиками.

В настоящем исследовании, в отличие от практикуемых известных структурных и механико-термических воздействий на кристаллическую решетку при обработке металла давлением, рассматривается новый путь управления пластической деформацией с помощью немеханических сил. Импульсы тока большой плотности, пропущенные через металл, нагруженный выше предела текучести при реализации электропластической деформации, обуславливают возникновение пондеромотор-

Расчет магнитного поля в образце в условии электропластичности. Под влиянием собственного магнитного поля тока, которое кольцевыми линиями охватывает проводник (деформируемый образец), возникает поляризация электронной подсистемы металла и, как следствие, появление поперечного электрического поля Холла, препятствующего дальнейшему сжатию электронной плазмы.

Рассмотрим уравнение, $\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{c^2}{4\pi\sigma\mu} \nabla^2 H$, которое согласуется с уравнением диффузии $\frac{\partial n}{\partial t} = D \nabla^2 n$. Выбрав проекцию на ось Z , запишем в виде

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = D_M \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $D_M = \frac{c^2}{4\pi\sigma\mu}$ – коэффициент магнитной диффузии, c – электродинамическая постоянная, μ – магнитная проницаемость, σ – удельная проводимость.

Так как поле вне образца изменяется по гармоническому закону, следующая Z проекция магнитного поля внутри образца будет

$$H_z(0, t) = H_0 \cos(\omega t) \quad (2)$$

на границе при $x = 0$. Гармоническая зависимость (2) характеризует так называемый стационарный скин-эффект [6].

Поскольку уравнение (1) линейно и содержит вещественные коэффициенты, то следующие выкладки можно упростить, перейдя к комплексной записи. Таким образом, будем искать решение другой вспомогательной задачи с заменой $\cos(\omega t)$ на комплексную экспоненту:

$$H_z(0, t) = H_0 e^{-i\omega t}. \quad (3)$$

Решение исходной задачи с вещественным полем можно получить из решения вспомогательной задачи с комплексным полем путем отделения вещественной части. Поскольку магнитное поле вне образца пропорционально $e^{-i\omega t}$, предположим, что решение вспомогательной задачи следует искать в виде

$$H_z(x, t) = H(x) e^{-i\omega t}. \quad (4)$$

Подставляя зависимость (4) в уравнение с частными производными (1), можно получить обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 H}{dx^2} = -\frac{2i}{\delta^2} H, \quad (5)$$

где $\delta = \sqrt{\frac{2D_M}{\omega}} = \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma\mu\omega}}$ имеет размерность длины.

Общее решение обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами находится в виде суммы экспонент $\mathbb{A} e^{ikx}$ с постоянными коэффициентами \mathbb{A} и k^2 . Коэффициент k находится постановкой e^{ikx} в уравнение (4). Алгебраическое уравнение $k^2 = \frac{2i}{\delta^2}$ имеет два корня $k_{\pm} = \pm \frac{1+i}{\delta}$. Один из них k_+ отвечает убывающему, а другой – нарастающему к оси образца (при $x \rightarrow \infty$) переменному магнитному полю. Нарастающее в радиальном направлении магнитное поле следует опустить, так как оно отвечает бессмысленному увеличению магнитного поля вплоть до бесконечного значения при удалении от источника. Таким образом, внутри проводника решение вспомогательной задачи имеет вид

$$H_z(x, t) = \mathbb{A} e^{-\frac{(1-i)x}{\delta}} e^{-i\omega t}. \quad (6)$$

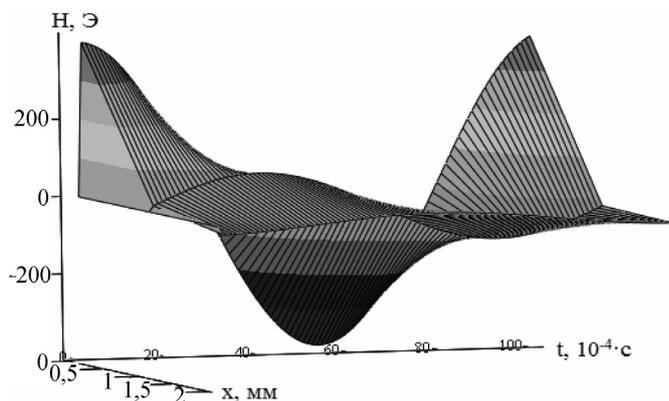


Рис. 2. Изменение магнитного поля в образце магния при $\nu = 600$ Гц

Fig. 2. The change of magnetic field in magnesium sample at $\nu = 600$ Hz

Коэффициент A можно найти из условия непрерывности тангенциальной проекции напряженности магнитного поля на границе образца при $x = 0$. Поскольку вне проводника при $x = 0$ напряженность магнитного поля изменяется по закону $H_z(0, t) = H_0 e^{-i\omega t}$, заключаем, что $A = H_0$. Следовательно,

$$H_z(x, t) = H_0 e^{-\frac{(1-i)x}{\delta}} e^{-i\omega t}. \quad (7)$$

Определяя вещественную часть комплексной функции $H_z(x, t)$, найдем вещественное магнитное поле в образце:

$$H_z(x, t) = H_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right), \quad (8)$$

где δ толщина скин-слоя [5].

Для определения значения магнитного поля, возникающего от пондеромоторных факторов при электропластической деформации 35 переходной прокаткой образцов магния, воспользуемся программой Mathcad Professional с учетом конечных параметров последнего перехода деформационного магния: $s = 4$ мм – площадь поперечного сечения образца; $r = 2$ мм – радиус сечения образца; $j = 10^3$ А/мм² – плотность тока; $\tau = 10^{-4}$ с – длительность импульса; $\nu = 600$ Гц – частота; $\sigma = 22,7 \cdot 10^3$ См/мм – удельная проводимость магния.

Как видно из графика на рис. 2, в образце деформационного магния с конечными параметрами на последнем переходе наблюдается изменение магнитного поля, причем при перемещении от центра к поверхности образца напряженность магнитного поля увеличивается и достигает значения $H = 400$ Э, на расстоянии 1 мм от центра поперечного сечения образца напряженность магнитного поля принимает значение $H = 100$ Э.

Расчет электрического поля и плотности тока в образце в условиях электропластичности. Для расчета электрического поля, возникающего от вторичных пондеромоторных факторов в образце, воспользуемся уравнением

$$\text{rot } H = \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} j, \quad (9)$$

в котором опустим ток смещения и запишем в виде

$$\text{rot } H = \frac{4\pi}{c} j. \quad (10)$$

С учетом закона Ома $j = \sigma E$ выразим напряженность электрического поля в виде

$$E = \frac{c}{4\pi\sigma} \text{rot } H. \quad (11)$$

Подставив в (11) зависимость напряженности магнитного поля (7), заключаем, что электрическое поле имеет только y компоненту:

$$E_y = (1-i) \sqrt{\frac{\omega\mu}{8\pi\sigma}} H_z. \quad (12)$$

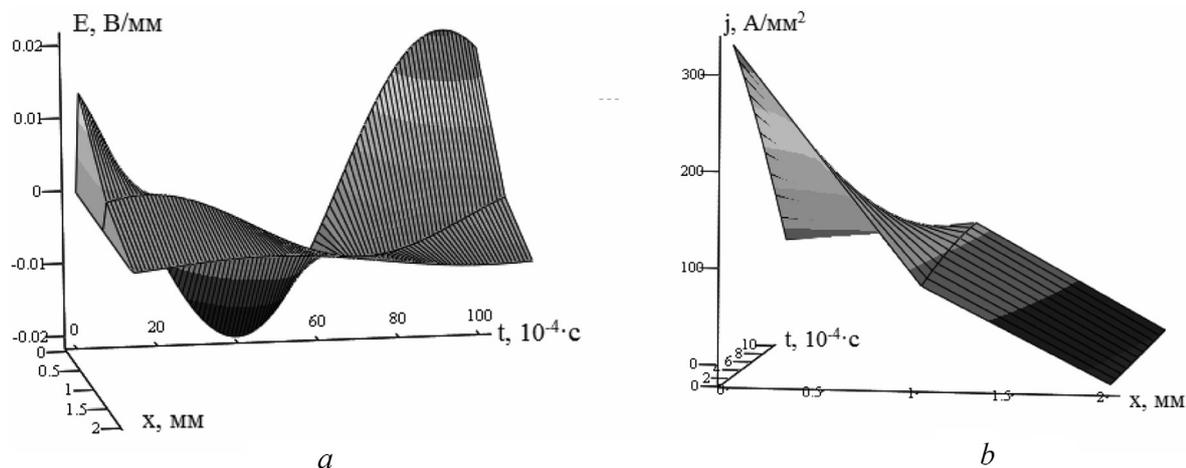


Рис. 3. Распределение электрического поля (а) и плотности тока (б) в образце деформационного магния в условиях электропластичности при $\nu = 600$ Гц

Fig. 3. The distribution of electric field (a) and current density (b) of magnesium in deformed sample under electroplasticity at $\nu = 600$ Hz

Учтем Z компоненту магнитного поля H_z из формулы (7) и, выделив вещественную часть, получим

$$E_y(x, t) = \sqrt{\frac{\omega\mu}{4\pi\sigma}} H_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta} + \frac{\pi}{4}\right). \quad (13)$$

Умножая полученный результат на σ , найдем распределение плотности тока в образце [5]:

$$j_y(x, t) = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{4\pi}} H_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta} + \frac{\pi}{4}\right). \quad (14)$$

С помощью программы Mathcad Professional построим распределение электрического поля и плотности электрического тока при вторичных пондеромоторных факторах в явлении электропластичности деформационного магния с параметрами последнего технологического перехода (рис. 3).

Из графиков видно (рис. 3, а), что напряженность электрического поля изменяется от оси к стенкам и достигает максимального значения $E = 0,025$ В/мм на расстоянии в 1 мм от центра поперечного сечения образца, при этом напряженность магнитного поля принимает значение $H = 0,005$ А/мм. Плотность тока будет таким же образом неравномерно распределяться по сечению образца. Как видно из рис. 3, б, при перемещении от центра к поверхности образца плотность тока увеличивается и достигает максимального значения $j = 400$ А/мм².

Выводы. Импульсный ток большой плотности, пропущенный через металл во время деформации выше предела текучести, помимо электронно-пластического действия оказывает и пондеромоторное действие на деформируемый материал, обуславливая механические напряжения. При действии поперечного поля Холла на ионный остов кристаллической решетки металла с периодичностью подачи импульсов тока на фронте его нарастания создается ультразвуковая вибрация, которая активно влияет на кинетику пластической деформации и модифицирует служебные характеристики материала. При практическом использовании технологии электропластической деформации, особенно при обработке металлов давлением при волочении, прокатке и так далее, имеет смысл проанализировать физические условия создания пондеромоторных эффектов применительно к конкретным технически важным материалам. При деформации метал-

ла в условиях электропластичности, для реализации оптимальных значений достижения максимума пондеромоторных факторов, необходимо выбирать частоту импульса тока, при которой магнитное поле не успевает существенно проникать в образец, при этом скорость диффузии будет зависеть от проводимости металла и частоты тока.

Список использованных источников

1. Троицкий, О. А. Фундаментальные и прикладные исследования электропластической деформации металлов / О. А. Троицкий, В. С. Савенко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2013. – 375 с.
2. Remy, L. The kinetics of deformation twinning in face-centered cubic crystals and his relation with sires-strain diagram / L. Remy // *Acta met.* – 1978. – Vol. 26, N 3. – P. 433–451.
3. Рошупкин, А. М. О влиянии электрического тока и магнитного поля на взаимодействие дислокаций с точечными дефектами в металлах / А. М. Рошупкин, И. Л. Батаронов // *Физика твердого тела.* – 1988. – Т. 30, № 11. – С. 3311.
4. Савенко, В. С. Механическое двойникование и электропластичность металлов в условиях внешних энергетических воздействий / В. С. Савенко. – 2-е изд., доп. и перераб. – Минск: БГАФК, 2003. – 203 с.
5. Арцимович, Л. А. Элементарная физика плазмы / Л. А. Арцимович. – Изд. 3-е. – М.: Госатомиздат, 1969. – 98 с.
6. Стил, М. Взаимодействие волн в плазме твердого тела / М. Стил, Б. Вюраль ; пер. с англ. И. С. Веселовского. – М.: Атомиздат, 1973. – 248 с.
7. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю. В. Баранов [и др.]. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
8. Savenko, V. S. Electroplastic effect under the simultaneous superposition and magnetic fields / V. S. Savenko // *J. Appl. Phys.* – 1999. – Vol. 86, N 5. – P. 2479–2482.

References

1. Troitskii O.A., Savenko V.S. *Basic and applied researches of electroplastic deformation of metals.* Minsk, Information Computing Center of the Ministry of Finance, 2013. 375 p. (In Russian).
2. Remy L. The kinetics of deformation twinning in face-centered cubic crystals and his relation with sires-strain diagram. *Acta Metallurgica*, 1978, vol. 26, no. 3, pp. 433–451. Doi: 10.1016/0001-6160(78)90170-0
3. Roshchupkin A.M., Bataronov I.L. On the influence of electric current and magnetic field on the interaction of dislocations with point defects in metals. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 1988, vol. 30, no. 11, pp. 3311. (In Russian).
4. Savenko V.S. *A mechanical twinning and electroplasticity of metals in the conditions of external power influences.* Minsk, Belarusian State Academy of Physical Education, 2003. 203 p. (In Russian).
5. Artsimovich L.A. *Elementary physics of plasma.* Moskow, Gosatomizdat Publ., 1969. 98 p. (In Russian).
6. Steel M., Vural B. *Wave Interactions in Solid State Plasmas.* New York, McGraw Hill, 1969.
7. Baranov Yu.V., Troitskii O.A., Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. *Physical bases of electropulse and electroplastic processings and new materials.* Moskow, Moscow State Industrial University, 2001. 844 p. (In Russian).
8. Savenko V.S. Electroplastic effect under the simultaneous superposition and magnetic fields. *Journal of Applied Physics*, 1999, vol. 86, no. 5, pp. 2479–2482. Doi: 10.1063/1.371080

Информация об авторах

Савенко Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общей физики, Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина (ул. Студенческая, 28, 247760, Мозырь, Республика Беларусь). E-mail: savenko-vl@rambler.ru

Троицкий Олег Александрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН (Малый Харитоньевский пер., 4, 101990, Москва, Российская Федерация). E-mail: oatroitsky@rambler.ru

Силивонец Анастасия Геннадьевна – магистрант кафедры общей физики, Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина (ул. Студенческая, 28, 247760, Мозырь, Республика Беларусь). E-mail: silivonecanastasiya@mail.ru

Information about the authors

Savenko Vladimir Semenovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of General Physics, I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University (28, Student Str., 247760, Mozyr, Republic of Belarus). E-mail: savenko-vl@rambler.ru

Troitsky Oleg Aleksandrovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Regnum Scientific Employee, A.A. Blagonravov Engineering Institute of the Russian Academy of Sciences (4, Malyi Kharitonievsky lane, 101990, Moscow, Russian Federation). E-mail: oatroitsky@rambler.ru

Silivone Anastasiya Gennad'evna – Master Student, Department of Physical Total Heal, I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University (28, Student Str., 247760, Mozyr, Republic of Belarus). E-mail: silivonecanastasiya@mail.ru

Для цитирования

Савенко, В. С. Вклад пондеромоторных факторов в реализацию электропластической деформации / В. С. Савенко, О. А. Троицкий, А. Г. Силивонец // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 85–91.

For citation

Savenko V.S., Troickij O.A., Silivonec A.G. The contribution of ponderomotive factors in implementation of electroplasticity deformation. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnych navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 85–91. (In Russian).

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССОБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

УДК 621.039.5

Поступила в редакцию 23.11.2015

Received 23.11.2015

Л. И. Сальников, Н. М. Днепровская, И. Е. Рубин, И. А. Сальникова, Н. А. Тетерева

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

**ОЦЕНКА НАВЕДЕННОЙ АКТИВНОСТИ В ОБЛУЧАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА РЕАКТОРА ВВЭР-1200
В РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ И ПУТИ ЕЕ ОСЛАБЛЕНИЯ**

Обосновывается техническая возможность использования отработавшего ядерного топлива реактора ВВЭР-1200 в качестве источника гамма-излучения в радиационных технологиях, не требующих больших поглощенных доз. Для определения мощности поглощенной дозы в облучаемых материалах от отработавшей тепловыделяющей сборки (ОТВС) применена программа EGSnrc, представляющая систему компьютерных кодов, которая образует универсальный пакет для моделирования методом Монте-Карло связанного переноса электронов и γ -квантов применительно к энергиям выше нескольких килоэлектронвольт. Предложена конструкция радиационной установки, в которой облучатель на основе ОТВС или составленный из ряда твэлов, находящийся на дне бассейна, для облучения может подниматься как выше уровня воды, так и при необходимости оставаться под ее поверхностью. При этом слой воды между облучателем и облучаемым материалом играет роль экрана, ослабляющего наведенную нейтронную активность до безопасного уровня. В некоторых случаях уменьшить толщину слоя воды позволяет растворенная в воде борная кислота. Представлены результаты оценки времени облучения материалов и толщины экрана.

Ключевые слова: реактор ВВЭР, отработавшие тепловыделяющие сборки (ОТВС), наведенная активность, источник гамма-излучения, коэффициенты выноса, мощность дозы, конструкция радиационной установки, защитные экраны, ядерные реакции.

L.I. Salnikov, N.M. Dneprovskaya, I.E. Rubin, I.A. Salnikova, N.A. Tetereva

Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**INDUCED ACTIVITY ESTIMATE IN IRRADIATED MATERIALS WHEN USING VVER-1200 SPENT FUEL
FOR RADIOTECHNOLOGY AND WAYS OF ITS ATTENUATION**

Technical ability to use the VVER-1200 spent nuclear fuel as a source of γ -radiation to solve radiation technology problems is substantiated. The technology area for these sources is limited to the problems which do not require large absorbed doses. EGSnrc program is used to determine the absorbed dose in irradiated materials from the spent fuel assemblies (SFA). This program is a computer code system, which forms a versatile package for simulation by Monte Carlo method the bound transfer of electrons and gamma-rays with energy above a few keV. The design of the radiation installation with the irradiator based on the SFA or composed of a number of fuel rods is proposed. The irradiator is located on the bottom of the pool and can be raised above the water level, or remain under its surface, if necessary. This layer of water plays a role of the shield and decreases neutron activation of irradiated material to a safe level. In some cases, boric acid dissolved in water allows reduction of the thickness of the water layer. Results of the evaluation of materials irradiation time and the thickness of the water shield are presented.

Key words: VVER reactor, spent fuel assemblies (SFA), induced activity, γ -ray source, carrying out coefficients, dose power, design of radiation installations, shield, nuclear reactions.

Введение. После ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС и перевода ее блоков в режим стационарной годичной перегрузки (через 4–5 лет работы реактора ВВЭР-1200 на номинальной мощности) на площадке АЭС появятся отработавшие тепловыделяющие сборки (ОТВС) со средней глубиной выгорания топлива 55,5 МВт·сут/кгU. Ежегодно количество отработавшего ядер-

ного топлива (ОЯТ) будет увеличиваться на 84 ОТВС. Вследствие большой глубины выгорания топлива в реакторе ВВЭР-1200 каждая ОТВС на момент выгрузки из активной зоны содержит $130 \text{ г } ^{134}\text{Cs}$ и $955 \text{ г } ^{137}\text{Cs}$ – основных излучателей γ -квантов; интенсивность источника составляет $2,8 \cdot 10^{16} \text{ } \gamma\text{-кв./с}$ при средней энергии $\sim 0,6 \text{ МэВ}$. После 5-летнего хранения в приреакторном бассейне выдержки интенсивность источника γ -квантов равна $5,7 \cdot 10^{15} \text{ } \gamma\text{-кв./с}$, что соответствует активности 150 кКи. Таким образом, открывается принципиальная возможность использования ОТВС реактора ВВЭР-1200 как источника излучения в радиационных технологиях [1].

Однако, в отличие от стандартного кобальтового источника, при использовании ОТВС в качестве облучателей радиационных установок не исключено возникновение наведенной активности в облучаемых материалах вследствие появления радионуклидов в ядерных реакциях, вызванных нейтронами, которые испускаются актинидами выгоревшего топлива. Хотя сопутствующая гамма-излучению нейтронная активность ОТВС после 5-летней выдержки не превышает $4 \cdot 10^8 \text{ нейтр./с}$ (т. е. на несколько порядков ниже максимально допустимого уровня потока в критических сборках), необходимо подтверждение радиационной безопасности использования ОТВС в радиационных технологиях. С этой целью в данной работе рассчитывается накопление радионуклидов по количеству тех или иных реакций для разных материалов и типов задач радиационной технологии, после чего проводится сравнение с предельно допустимыми концентрациями этих радионуклидов. При необходимости ослабление наведенной в облучаемых материалах активности до безопасного уровня может быть достигнуто путем введения защитного экрана между ОТВС и облучаемым материалом, пропускающего гамма-излучение с большей вероятностью, чем нейтроны. Кроме того, вместо цельной ОТВС, вероятность вылета из которой γ -квантов составляет только 1/5, можно использовать облучатели, в которых твэлы расположены в один ряд и, следовательно, имеют вероятность вылета γ -квантов на одну сторону около 1/2.

Примеры задач радиационной технологии и составы материалов. Вследствие больших внешних размеров цельной ОТВС интенсивность потока вылетающих γ -квантов невелика и составляет примерно 10-ю часть интенсивности потока от стандартного кобальтового источника с активностью 200 кКи. Поэтому в данной работе рассматриваются задачи, требующие поглощенной дозы не более 30 кГр:

- 1) 50–500 Гр: предпосевное облучение семян с целью стимулирования всхожести (картофель (100 Гр), зерно (500 Гр));
- 2) 0,25–1,50 кГр: облучение продуктов питания для увеличения срока хранения (яблоки (0,25 кГр), картофель (1 кГр), мясо курицы (1,5 кГр));
- 3) 1–15 кГр: обработка медицинского сырья перед изготовлением лекарств (сухие травы, зерно (5 кГр), крахмал, мука (15 кГр));
- 4) 15–25 кГр: модификация полимерных изделий (полиэтилен);
- 5) 20–30 кГр: стерилизация медицинских изделий однократного применения: иглы инъекционные, хирургические инструменты (сталь); шприцы инъекционные (полиэтилен и сталь); чашки Петри и др. (стекло); одноразовые комплекты медицинского белья (хлопок).

Возможность облучения продуктов питания путем использования ОЯТ реакторов ВВЭР рассматривается в работе [2]. Показано, что необходимая поглощенная доза для рассмотренных продуктов (яблоки и куриное мясо) достигается за несколько часов облучения, причем наведенная нейтронами активность за этот промежуток времени мала и не превышает допустимых стандартов, действующих в США.

В данной работе предлагается конструкция радиационной установки (РУ), показанная на рис. 1. В положении облучателя 1 облучение происходит в воздухе, при необходимости в качестве экрана между облучателем и облучаемым материалом будет находиться слой воды 3. Положение 2 облучателя потребует, если время выдержки ОЯТ в приреакторном хранилище недостаточно большое и остаточное тепловыделение существенно.

В табл. 1 приведены изотопные составы материалов, рассматриваемых в данной работе. Перечень ядерных реакций, вызываемых нейтронами и приводящих к образованию тех или иных радионуклидов, приведен в табл. 2. Это реакции радиационного захвата (n, γ), размножения ($n, 2n$), реакции поглощения нейтрона с вылетом протона (n, p) или α -частицы (n, α).



Рис. 1. Упрощенная схема предлагаемой радиационной установки: 0 – нерабочее положение облучателя, 1 – облучатель в воздухе, 2 – облучатель в самой верхней части бассейна, 3 – облучатель под поверхностью воды

Fig. 1. Simplified diagram of the proposed radiation installation: 0 – “off” position of the irradiator, 1 – irradiator in the air, 2 – irradiator in the uppermost part of the pool, 3 – irradiator under the water surface

Таблица 1. Весовые доли элементов в облучаемых материалах, %
Table 1. Weight fraction of elements in the irradiated materials, %

Элемент	Облучаемый материал									
	Яблоко	Картофель	Курица	Мука (зерно)	Крахмал	Полиэтилен	Сталь	Сталь + полиэтилен	Стекло	Хлопок
H	10,3	10,01	9,1	7,05	6,2	14,3		12,518		6,5
C	6,1	9,75	23,3	39,34	44,4	85,7	0,12	75,037		46,0
N		0,33	2,9	1,81						
O	83,5	79,39	57,1	51,253	49,4				46,7	47,5
Na				0,004					11,1	
Mg		0,02	0,1	0,044						
Si		0,01					0,8	0,09968	35,1	
P		0,06	2,5	0,115						
S			0,1	0,16			0,02	0,00249		
Cl				0,024						
K	0,1	0,43	5,0	0,176						
Ca				0,024					7,1	
Cr							18	2,2428		
Mn							2	0,2492		
Fe							68,6	8,5476		
Co							0,5	0,0623		
Ni							9,96	1,2410		

Допустимые уровни содержания радионуклидов. Принятые значения предельных содержаний радионуклидов $A_{нр,l}$ в материалах для разных задач радиационной технологии основаны на референтных уровнях содержания радионуклидов в питьевой воде, представлены в Санитарных нормах и правилах «Требования к радиационной безопасности». Средние за год значения удельной активности радионуклидов в питьевой воде не могут превысить установленных. В указанных Санитарных нормах и правилах референтные уровни представлены не для всех радионуклидов, для части из них приняты минимальные (из всех приведенных) значения.

Таблица 2. Ядерные реакции, приводящие к образованию радионуклидов

Table 2. Nuclear reactions leading to the formation of radionuclides

Радионуклид	Период полураспада	Постоянная распада, 1/с	Реакции образования
^3H	12,3 лет	$1,787\text{e}-9$	$^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$
^{11}C	0,340 ч	$5,663\text{e}-4$	$^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$
^{14}C	5730 лет	$3,836\text{e}-12$	$^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$; $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$; $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$
^{22}Na	2,60 лет	$8,454\text{e}-9$	$^{23}\text{Na}(n, 2n)^{22}\text{Na}$
^{24}Na	15,0 ч	$1,284\text{e}-5$	$^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$; $^{24}\text{Mg}(n, p)^{24}\text{Na}$
^{31}Si	2,62 ч	$7,349\text{e}-5$	$^{30}\text{Si}(n, \gamma)^{31}\text{Si}$; $^{31}\text{P}(n, p)^{31}\text{Si}$
^{32}P	14,3 сут	$5,610\text{e}-7$	$^{31}\text{P}(n, \gamma)^{32}\text{P}$; $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$; $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$
^{33}P	25,4 сут	$3,158\text{e}-7$	$^{33}\text{S}(n, p)^{33}\text{P}$
^{35}S	87,4 сут	$9,179\text{e}-8$	$^{34}\text{S}(n, \gamma)^{35}\text{S}$; $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$
^{36}Cl	$3,01 \cdot 10^5$ лет	$7,302\text{e}-14$	$^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$; $^{37}\text{Cl}(n, 2n)^{36}\text{Cl}$; $^{39}\text{K}(n, \alpha)^{36}\text{Cl}$
^{38}Cl	0,620 ч	$3,105\text{e}-4$	$^{37}\text{Cl}(n, \gamma)^{38}\text{Cl}$; $^{41}\text{K}(n, \alpha)^{38}\text{Cl}$
^{40}K	$1,28 \cdot 10^9$ лет	$1,717\text{e}-17$	$^{39}\text{K}(n, \gamma)^{40}\text{K}$; $^{41}\text{K}(n, 2n)^{40}\text{K}$; $^{40}\text{Ca}(n, p)^{40}\text{K}$
^{42}K	12,4 ч	$1,553\text{e}-5$	$^{41}\text{K}(n, \gamma)^{42}\text{K}$; $^{42}\text{Ca}(n, p)^{42}\text{K}$
^{43}K	22,6 ч	$8,520\text{e}-6$	$^{43}\text{Ca}(n, p)^{43}\text{K}$
^{44}K	0,369 ч	$5,218\text{e}-4$	$^{44}\text{Ca}(n, p)^{44}\text{K}$
^{41}Ca	$1,40 \cdot 10^5$ лет	$1,570\text{e}-13$	$^{40}\text{Ca}(n, \gamma)^{41}\text{Ca}$; $^{42}\text{Ca}(n, 2n)^{41}\text{Ca}$
^{45}Ca	163 сут	$3,412\text{e}-8$	$^{44}\text{Ca}(n, \gamma)^{45}\text{Ca}$
^{49}Cr	0,702 ч	$2,743\text{e}-4$	$^{50}\text{Cr}(n, 2n)^{49}\text{Cr}$
^{51}Cr	27,7 сут	$2,896\text{e}-7$	$^{50}\text{Cr}(n, \gamma)^{51}\text{Cr}$; $^{52}\text{Cr}(n, 2n)^{51}\text{Cr}$; $^{54}\text{Fe}(n, \alpha)^{51}\text{Cr}$
^{54}Mn	312 сут	$2,571\text{e}-8$	$^{55}\text{Mn}(n, 2n)^{54}\text{Mn}$; $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$
^{56}Mn	2,58 ч	$7,463\text{e}-5$	$^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$; $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$
^{55}Fe	2,70 г.	$8,141\text{e}-9$	$^{54}\text{Fe}(n, \gamma)^{55}\text{Fe}$; $^{56}\text{Fe}(n, 2n)^{55}\text{Fe}$; $^{58}\text{Ni}(n, \alpha)^{55}\text{Fe}$
^{59}Fe	44,5 сут	$1,803\text{e}-7$	$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}$; $^{59}\text{Co}(n, p)^{59}\text{Fe}$; $^{62}\text{Ni}(n, \alpha)^{59}\text{Fe}$
^{58}Co	70,8 сут	$1,133\text{e}-7$	$^{59}\text{Co}(n, 2n)^{58}\text{Co}$; $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$
$^{58\text{m}}\text{Co}$	9,15 ч	$2,104\text{e}-5$	$^{59}\text{Co}(n, 2n)^{58\text{m}}\text{Co}$; $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58\text{m}}\text{Co}$
^{60}Co	5,27 г.	$4,171\text{e}-9$	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60\text{m}}\text{Co}$; $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60\text{m}}\text{Co}$
$^{60\text{m}}\text{Co}$	0,174 ч	0,001107	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$; $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$
^{61}Co	1,65 ч	$1,167\text{e}-4$	$^{61}\text{Ni}(n, p)^{61}\text{Co}$
$^{62\text{m}}\text{Co}$	0,232 ч	$8,299\text{e}-4$	$^{62}\text{Ni}(n, p)^{62\text{m}}\text{Co}$
^{57}Ni	1,50 сут	$5,348\text{e}-6$	$^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$;
^{59}Ni	$7,50 \cdot 10^4$ лет	$2,931\text{e}-13$	$^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}$; $^{60}\text{Ni}(n, 2n)^{59}\text{Ni}$
^{63}Ni	96 лет	$2,290\text{e}-10$	$^{62}\text{Ni}(n, \gamma)^{63}\text{Ni}$; $^{64}\text{Ni}(n, 2n)^{63}\text{Ni}$
^{65}Ni	2,52 ч	$7,641\text{e}-5$	$^{64}\text{Ni}(n, \gamma)^{65}\text{Ni}$

Допустимые значения содержания радионуклидов в рассматриваемых продуктах питания увеличены по сравнению с референтными уровнями содержания радионуклидов в питьевой воде, учитывая, что потребление этих продуктов существенно меньше: например, в яблоках и картофеле – в 3 раза, в мясе курицы – в 10 раз. Принятые максимально допустимые значения содержания радионуклидов после обработки медицинского сырья и облучения семян (крахмал, зерно, мука) превышают соответствующие уровни для воды в 25 раз.

Для модификации полимеров и стерилизации медицинских изделий (сталь, полиэтилен, сталь + полиэтилен, стекло, хлопок) в качестве допустимых значений содержания радионуклидов принимаются уровни изъятия для умеренных количеств (< 1 т) материала без дальнейшего рассмотрения по удельной активности (Санитарные нормы и правила, прил. 4, табл. 1, с. 162).

Модели расчета переноса γ -квантов и нейтронов. Для определения мощности поглощенной дозы в облучаемых материалах от ОТВС применена программа EGSnrc [3], представляющая систему компьютерных кодов, которая образует универсальный пакет для моделирования методом Монте-Карло связанного переноса электронов и γ -квантов применительно к энергиям выше нескольких килоэлектронвольт. Все 312 тепловыделяющих элементов и 19 каналов ТВС образуют 11 шестиугольных рядов. Поскольку прямое моделирование переноса γ -квантов внутри ТВС с помощью кода EGSnrc оказывается достаточно сложным, создана упрощенная модель в двумерной (r, z)-геометрии. В центральной части расчетной области находится гомогенный цилиндр высотой 373 см и радиусом 12 см, моделирующий ОТВС, за ним – кольцевой слой облучаемого материала с внутренним радиусом 30 см и толщиной (в зависимости от плотности) от 15 до 2 см, разбитый равномерно по радиусу на три зоны. Уменьшение толщины слоя облучаемого материала при увеличении плотности позволяет сохранить его «оптическую толщину» (произведение плотности и толщины материала) и тем самым поддерживать неравномерность поглощенной дозы по толщине в заданных пределах: ближняя зона получает дозу примерно вдвое большую, чем дальняя, как и в [2]. При меньших толщинах материалов доза была бы более однородна по объему. В расчетах учитывалось энергетическое распределение рожденных γ -квантов, показанное для различных значений времени выдержки на рис. 2.

В данной работе накопление радионуклидов оценивается нами как произведение четырехгрупповых потоков нейтронов в облучаемых материалах и соответствующих сечений реакций

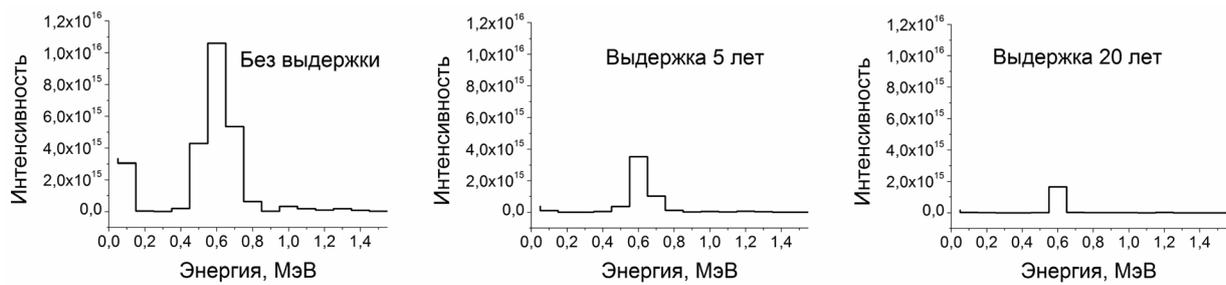


Рис. 2. Энергетический спектр источника γ -квантов
 Fig. 2. Energy spectrum of the γ -quanta source

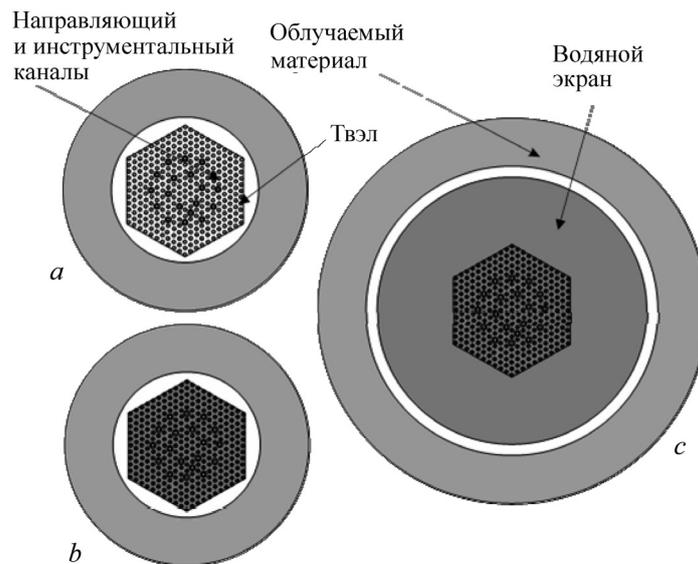


Рис. 3. Модель расчета потока нейтронов в облучаемых материалах по коду MCU-FREE: *a* – ОТВС в воздухе, *b* – в воде только ОТВС, *c* – ОТВС и пространство до облучаемого материала заполнены водой
 Fig. 3. Neutron flux calculation model in irradiated materials using code MCU-FREE: *a* – spent fuel assemblies in the air, *b* – only spent fuel assemblies in water, *c* – spent fuel assemblies and space to the irradiated material are filled with water

образования радионуклидов. Распределение плотности потока нейтронов в облучаемых материалах рассчитывалось методом Монте-Карло по коду MCU-FREE, расширенной версии MCURFFI [4]. Геометрия расчетных моделей приведена на рис. 3. Энергетическое распределение нейтронов источника, главным образом обусловленного спонтанными делениями изотопа ^{244}Cm , мало отличается от спектра вынужденного деления ^{235}U [5]. Четырехгрупповые сечения реакций определялись с помощью доступных модулей кода NJOI [6].

Величины мощности поглощенной дозы d_m материалов m для двух вариантов облучения, когда облучатель и облучаемые материалы находятся в воздухе и когда облучатель и пространство до облучаемого материала заполнено водой, играющей роль защитного экрана, представлены в табл. 3. В качестве примера приводятся данные только для ОТВС после 5-летней выдержки в хранилище.

Таблица 3. Мощности дозы d_m , Гр/ч, получаемые разными материалами при облучении от одной ОТВС пятилетней выдержки

Table 3. Dose rates d_m , Gy/h, received by various materials at irradiation from one spent fuel assemblies of five-year endurance

Параметр	Яблоко	Картофель	Курица	Мука (зерно)	Крахмал	Полиэтилен	Сталь	Сталь + полиэтилен	Стекло	Хлопок
Плотность, г/см ³	0,6	0,6	1,0	0,65	1,5	0,92	7,9	0,27919	2,5	0,55
Толщина зоны, см	5,0	5,0	3,5	4,75	2,5	3,5	0,67	7,5	1,75	5,1
<i>ОТВС в воздухе</i>										
1-я зона	156	157	161	153	160	168	165	152	156	150
2-я зона	111	111	117	110	118	122	121	106	116	108
3-я зона	79	79	82	77	84	87	83	76	82	78
Средняя мощность	112	112	118	110	119	123	122	107	117	109
<i>ОТВС в воде</i>										
1-я зона	52	52	55	51	54	55	67	56	57	50
2-я зона	36	37	39	35	38	39	39	38	39	35
3-я зона	25	25	26	25	27	27	25	26	26	25
Средняя мощность	37	37	39	36	39	39	43	38	40	35

Зависимость интенсивности излучения от толщины экрана в расчетной модели. Зависимость интенсивности γ -квантов и нейтронов I от «оптической толщины» экрана (произведения его плотности и толщины) экспоненциальная [3]:

$$I(x) = I_0 e^{-cx}, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность излучения, падающего на экран, с⁻¹; x – толщина экрана, см. Данная формула не учитывает особенности предложенной конструкции облучателя (и соответствующих расчетных моделей), когда водяной экран и облучаемые материалы имеют вид цилиндрических слоев, окружающих ОТВС. В такой геометрии с увеличением толщины экрана ослабление излучения происходит не только вследствие поглощения, но и при их «геометрическом растекании». И наоборот, при небольшой толщине экрана можно приблизить облучаемые материалы к облучателю, что приведет к увеличению интенсивности облучения и сокращению необходимого времени облучения. С учетом сказанного зависимость интенсивности излучения от x для принятой расчетной модели описывается выражением

$$I(x) = I_0 e^{-cx} \frac{R_2}{R_1 + \Delta R + x}. \quad (2)$$

В соответствии с расчетной моделью (когда облучатель – цельная ОТВС), показанной на рис. 3 (при выдержке 20 лет), R_1 – эффективный радиус ОТВС, примерно равный 12 см; R_2 – внутренний радиус слоя облучаемого материала, равный 30 см; ΔR – промежуток между слоем воды и облучаемым материалом, принятый равным 3 см.

При поиске времен облучения материалов и (в случае необходимости) оптимальных толщин экрана x предполагается, что зависимость (2) справедлива и для мощности поглощенной дозы d , и для характеристики скорости наводимой нейтронами активности A . Коэффициенты c определяются следующим образом:

$$c = -\frac{1}{R_2 - R_1} \ln \frac{I(x)}{I_0}. \quad (3)$$

Характеристика суммарной по всем радионуклидам l скорости наводимой активности A , $1/\text{ч}$, является указателем степени радиационного воздействия на человека облученного материала для всех категорий лиц (персонал и население) (см. Санитарные нормы и правила):

$$A = \sum_l \frac{A_l}{A_{np,l}}, \quad (4)$$

где A_l , Бк/(кг·ч), и $A_{np,l}$ Бк/кг, – соответственно рассчитанная скорость образования и предельно допустимая концентрации радионуклида l в материале. Величина A_l определяется из соотношения

$$A_l = 1000 \delta_l \lambda_l / (V \gamma), \quad (5)$$

где δ_l – количество образующегося в облучаемом материале ядер радионуклида l в единицу времени, ядер/ч; λ_l – постоянная распада, $1/\text{с}$; V и γ – соответственно объем, см^3 , и плотность, $\text{г}/\text{см}^3$, облучаемого материала; 1000 – переводной коэффициент. Значение произведения $AT < 1$ (T – время облучения, ч) указывает на безопасность для человека суммарной наведенной активности материала.

Скорость образования радионуклида l в единицу времени определяется следующим выражением:

$$\delta_l = N \sum_{l'} \rho_{l'} \sum_{i=1}^4 \sigma_{i,l' \rightarrow l} \Phi_i V, \quad (6)$$

где $\rho_{l'}$ – концентрации исходных ядер l' , ядер/ см^3 ; $\sigma_{i,l' \rightarrow l}$ четырехгрупповые сечения реакции образования радионуклида l , см^2 ; $\Phi_i V$ – четырехгрупповые интегральные по объему облучаемого материала V потоки, полученные по коду MCU-FREE, нейтр.: $\text{см}/\text{с}$; N – коэффициент нормировки. Значения N равны $3600 \cdot 4,6 \cdot 10^8 / 312$; $3600 \cdot 3,8 \cdot 10^8 / 312$ и $3600 \cdot 2,2 \cdot 10^8 / 312$ для ОТВС выдержки 0, 5 и 20 лет.

Характеристики скорости, наводимой нейтронами активности в материалах для двух типов облучателя при пятилетней выдержке топлива в воздухе и с водяным слоем толщиной 18 см, приведены в табл. 4.

Таблица 4. Характеристики скорости наводимой нейтронами активности в облучаемых материалах A_m , $10^{-3}/\text{ч}$ для ОЯТ с выдержкой в хранилище 5 лет

Table 4. Characteristics of speed of the activity induced by neutrons in the irradiated materials A_m , $10^{-3}/\text{h}$ for spent nuclear fuel with endurance in storage of 5 years

Облучатель	Среда между облучателем и материалом	Материал						
		Яблоко	Картофель	Курица	Мука (зерно)	Сталь	Полиэтилен + сталь	Стекло
Цельная ОТВС	Воздух	3,93	31,1	129	4,74	17,6	58,5	0,0215
	Вода	0,418	3,36	12,6	0,648	25,7	7,67	0,825
Ряд из 13 твэлов	Воздух	0,164	1,30	5,38	0,198	0,733	2,44	0,00090
	Вода	0,0174	0,140	0,525	0,027	1,07	0,320	0,0344

Примечание: для составов, приведенных в табл. 1, скорость наводимой нейтронами активности в крахмале, полиэтилене и хлопке оказывается пренебрежимо малой и в данной таблице не приводится.

Таблица 5. Время облучения и при необходимости толщины экрана (слоя воды) для задач радиационной технологии
 Table 5. Irradiation time and, if necessary, shield thickness (water layer) for problems of radiation technology

Тип облучателя	Время выдержки ОЯТ, лет	Задачи радиационных технологий / Облучаемые материалы / Принятые дозы, кГр														
		Стимулирование всхожести семян			Увеличение срока хранения продуктов питания			Обработка медицинского сырья			Модифицирование полимеров			Стерилизация медицинских изделий		
		Картофель	Зерно	Яблоко	Картоф.	Курица	Зерно	Крахмал	Мука	Полиэтилен	Сталь	П+С	Стекло	Хлопок		
Цельная ОТВС	0	0,1	0,5	0,25	1,0	1,5	5	15	15	15	15	20	25	25	25	25
	5	7 мин	34 мин	16 мин	1,1 ч	1,6 ч	5,6 ч	17 ч	20 ч	—	—	20 ч	12 сут	1,1 сут	—	1,2 сут
	20	27 мин	2,3 ч	1,1 ч	4,5 ч	14 ч	23 ч	2,8 сут	3,4 сут	—	—	3,4 сут	—	4,5 сут	—	4,8 сут
Ряд из 13 ТВЭЛОВ	0	—	—	—	—	8 см	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5	1,5 ч	7,6 ч	3,7 ч	15 ч	4,6 сут	3,2 сут	8,7 сут	11 сут	—	—	11 сут	—	15 сут	—	16 сут
	20	9 мин	48 мин	23 мин	1,6 ч	2,2 ч	7,9 ч	22 ч	1,2 сут	—	—	1,2 сут	1,5 сут	1,6 сут	—	1,7 сут
Ряд из 13 ТВЭЛОВ	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5	38 мин	3,3 ч	1,6 ч	6,4 ч	9,2 ч	1,4 сут	3,8 сут	4,9 сут	—	—	4,9 сут	6,2 сут	7,0 сут	—	7,0 сут
	20	2,1 ч	10 ч	5,2 ч	21 ч	1,2 сут	4,3 сут	12 сут	16 сут	—	—	16 сут	20 сут	21 сут	2 мес.	23 сут

Примечания. Верхнее число – время облучения, нижнее – толщина экрана (слоя чистой воды над облучателем).
 П+С – полиэтилен и сталь (объемные доли стали, полиэтилена и пустоты 0,01944; 0,1366; 0,844).
 В случаях, когда время облучения превышает 2 мес., результаты оценки не приводятся.

Определение времени облучения (и, если требуется, толщины экрана) начинается с проверки возможности облучения в воздухе при $x = 0$. В соответствии с зависимостью (2) мощность поглощенной дозы при минимальном удалении облучаемого материала от облучателя составляет $2d_{0,m}$, Гр/ч ($d_{0,m}$ – мощность дозы, соответствующая нулевой толщине экрана). Тогда время облучения материала t

$$T_{0,m} = \frac{D_m}{2d_{0,m}}, \quad (7)$$

где D_m – величина дозы, требуемая для материала t , Гр; $T_{0,m}$, – время облучения, ч, при котором обеспечивается получение дозы.

Когда произведение $2A_{0,m}T_{0,m} < 1$, допустимый предел не превышает и необходимость в экране отсутствует. Но если $2A_{0,m}T_{0,m} \geq 1$, то между облучателем и облучаемым материалом следует расположить экран (в предлагаемой конструкции слой воды толщиной x). Минимальное значение толщины экрана x_m определяется следующим образом:

$$A_{\text{экр.,}m}(x_m)T_{\text{экр.,}m}(x_m) = 1,$$

где

$$A_{\text{экр.,}m}(x_m) = A_{0,m} \exp(-c_n x_m) \frac{R_2}{R_1 + \Delta R + x_m}, \quad d_{\text{экр.,}m}(x_m) = d_{0,m} \exp(-c_\gamma x_m) \frac{R_2}{R_1 + \Delta R + x_m}.$$

Результаты расчетов. Результаты оценки времени облучения материалов и, при необходимости, толщины экрана (слоя чистой воды над облучателем) приведены в табл. 5. Поскольку время облучения пропорционально требуемой поглощенной дозе, то наименьшее время облучения, как правило, от нескольких минут до нескольких часов, требуется для стимулирования всхожести семян и облучения продуктов питания (для увеличения срока хранения). Максимальное время облучения при использовании ОЯТ (от нескольких суток до нескольких месяцев) необходимо для радиационных технологий, требующих поглощенной дозы 25 кГр. Для целей практики времена облучения порядка нескольких месяцев неприемлемы, поэтому в табл. 5 результаты оценки в таких случаях не приводятся.

С увеличением времени выдержки ОЯТ в хранилище интенсивность испускаемых γ -квантов падает, а требуемое время облучения растет. Кроме того, с увеличением времени выдержки растет и соотношение интенсивности испускаемых нейтронов и γ -квантов, а также и наведенная нейтронами активность в облучаемых материалах. Так, в случае облучения мяса курицы с помощью цельной ОТВС требуется защита от нейтронов, еще больше увеличивающая время облучения.

Таблица 6. Времена облучения и толщины экрана из чистой и борированной воды для некоторых радиационных технологий при использовании ОТВС

Table 6. Irradiation time and thickness of the shield from clean and borated water for some radiation technologies while using the spent fuel assemblies

Время выдержки ОТВС в хранилище, лет	Облучаемые материалы (требуемые поглощенные дозы, кГр)					
	Мясо курицы (1,5)		Мука (15)		Сталь (25)	
	1	2	1	2	1	2
0	1,6 ч нет экрана		17 ч нет экрана		> 2 мес.	2,6 сут 9 см
5	14 ч 8 см	7,3 ч 2 см	2,8 сут нет экрана		> 2 мес.	1,6 мес. 26 см
20	4,6 сут 17 см	1,9 сут 8 см	21 сут 6 см	8,7 сут 1 см	> 2 мес.	> 2 мес.

Примечание: 1 – результат соответствует экрану из чистой воды (если есть), 2 – результат соответствует экрану из борированной воды.

Использование облучателя, составленного из ряда 13 твэлов, примерно в 20 раз уменьшает выход нейтронов из ОЯТ, а выход γ -квантов – только в 1,5 раза. Таким образом, применение облучателя, представляющего собой ряд твэлов, хотя и увеличивает время облучения, однако позволяет практически полностью обходиться без защитных экранов для уменьшения наведенной активности. Исключение составляет только случай облучения среды полиэтилена и стали, когда облучатель собран из твэлов 20-летней выдержки после извлечения из активной зоны.

Использование раствора борной кислоты в радиационной установке. Наведенная нейтронами активность облучаемых материалов, частично обусловлена появлением радионуклидов в реакции (n, γ) , вызываемой в основном тепловыми нейтронами. В данной работе для дополнительного ослабления тепловых нейтронов экраном применяется концентрированный раствор борной кислоты (при комнатной температуре). Его эффективность на примере облучения мяса курицы, муки и стали показана в табл. 6. Использование борированной воды в качестве экранирующего материала позволяет существенно снизить толщину слоя воды и тем самым уменьшить требуемое время облучения до приемлемых величин.

Заключение. Существует принципиальная возможность использовать в качестве облучателей радиационной установки отработавшее топливо реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС для задач радиационной технологии, не требующих большой поглощенной дозы. В тех случаях, когда наведенная нейтронами активность облучаемых материалов превышает допустимые нормативами пределы, предлагается использовать в качестве экранирующего материала слой борированной воды. Продолжением исследований по использованию ОЯТ в качестве облучателя в задачах радиационной технологии могла бы быть разработка технологических и конструкторских решений, направленных на повышение его эффективности.

Список использованных источников

1. Оценка технических возможностей использования отработавших тепловыделяющих сборок реактора ВВЭР-1200 в качестве источника гамма-излучения для радиационно-технологических процессов / Л. И. Сальников [и др.] // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2014. – № 2. – С. 38–44.
2. Irradiation of Food Using Spent Nuclear Fuel / B. Betzler [et al.] // Trans. Amer. Nucl. Soc. – 2010. – Vol. 103. – P. 67–68.
3. EGSnrc: software tool to model radiation transport [Electronic resource] // National Research Council Canada. – Mode of access: <http://irs.inms.nrc.ca/software/egsnrc/>. – Date of access: 10.06.2010.
4. Описание применения и инструкция для пользователя программой MCU-RFFI расчета методом Монте-Карло нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов / Е. А. Гомин [и др.]. – М.: РИЦ «Курчатов. ин-т», 1994. – 63 с.
5. Залубовский, И. И. Внешнее излучение контейнера сухого хранения отработавшего ядерного топлива ВВЭР-1000 Запорожской АЭС / И. И. Залубовский, С. А. Письменецкий, В. Г. Рудычев // Атом. энергия. – 2010. – Т. 109, вып. 6. – С. 324–329.
6. The NJOY Nuclear Data Processing System Version 91: report LA-12740-M / Los Alamos National Laboratory ; R. E. MacFarlane, D. W. Muir. – Los Alamos, 1994.

References

1. Salnikov L.I., Dneprovskaya N.M., Kuzmin A.V., Novikov I.A., Rubin I.E., Salnikova I.A., Tetereva N.A. Evaluation of the technical possibilities of using spent fuel assemblies VVER-1200 as a source of gamma radiation for radiation-technological processes. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2014, no 2, pp. 38–44. (In Russian).
2. Betzler B., Hadgu H., Lawrence C., Orians M., Pavlou A., Poitrasson-Riviere A. Irradiation of Food Using Spent Nuclear Fuel. *Transactions of the American Nuclear Society*, 2010, vol. 103, pp. 67–68.
3. EGSnrc: software tool to model radiation transport. *National Research Council Canada*. Available at: <http://irs.inms.nrc.ca/software/egsnrc/> (accessed 10 June 2010).
4. Gomin E.A., Gurevich M.I., Maiorov L.V., Marin S.V. Application description and instruction for the user of the MCU-RFFI program of calculation by the Monte Carlo method of neutron and physical characteristics of nuclear reactors. Moscow, National Research Center “Kurchatov Institute”, 1994. 63 p. (In Russian).
5. Zalubovskii I.I., Pismeneckii S.A., Rudychev V.G. External radiation of a container used for dry storage of spent VVER-1000 nuclear fuel from the Zaporozhie nuclear power plant. *Atomic Energy*, 2010, vol. 109, no. 6, pp. 396–403. Doi: 10.1007/s10512-011-9374-8
6. MacFarlane R.E., Muir D.W. The NJOY Nuclear Data Processing System Version 91. Los Alamos National Laboratory report LA-12740-M, October 1994.

Информация об авторах

Сальников Леонард Игнатьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 222109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: salnikov@sosny.bas-net.by

Днепровская Нина Михайловна – научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 222109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rubin@sosny.bas-net.by

Рубин Исаак Ефимович – старший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 222109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rubin@sosny.bas-net.by

Сальникова Ирина Аркадьевна – старший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 222109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: salirina@mail.ru

Тетерева Наталья Александровна – научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 222109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tetna@mail.ru

Для цитирования

Оценка наведенной активности в облучаемых материалах при использовании отработавшего топлива реактора ВВЭР-1200 в радиационных технологиях и пути ее ослабления / Л. И. Сальников [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 92–102.

Information about the authors

Salnikov Leonard Ignatievich – Ph. D. (Physical and Mathematics), Head of the laboratory, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 222109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: salnikov@sosny.bas-net.by

Dniaprovskaya Nina Michailovna – Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 222109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rubin@sosny.bas-net.by

Rubin Isaac Efimovich – Senior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 222109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rubin@sosny.bas-net.by

Salnikova Iryna Arkadieвна – Senior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 222109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: salirina@mail.ru

Tetereva Natalia Aleksandrovna – Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 222109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tetna@mail.ru

For citation

Salnikov L.I., Dneprovskaya N.M., Rubin I.E., Salnikova I.A., Tetereva N.A. Induced activity estimate in irradiated materials when using VVER-1200 spent fuel for radiotechnology and ways of its attenuation. *Vestsi Natsyyanal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no.1, pp. 92–102. (In Russian).

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

УДК 537.8:517.958:621.35

Поступила в редакцию 15.10.2015
 Received 15.10.2015

В. Т. Ерофеев

*НИИ прикладных проблем математики и информатики
 Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ
 ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА ФУЛЛЕРЕН**

Разработана интегро-дифференциальная математическая модель фуллера C_{60} , состоящая из 60 атомов углерода, расположенных на поверхности сферы S радиуса R . Смещения 6 электронов углерода двух сортов ($l = 1, 2$) при воздействии электрического поля \vec{E} описаны с помощью осцилляторной дифференциальной модели

$$m_e \frac{d^2 \vec{r}_l}{dt^2} + \eta_l \frac{d \vec{r}_l}{dt} + k_l \vec{r}_l = e \vec{E} \exp(-i\omega t), \quad l = 1, 2,$$

где m_e, e – масса и заряд электрона, η_l – коэффициент трения, k_l – коэффициент упругости, \vec{r}_l – смещение электрона сорта l под действием поля.

Дискретно-структурная наночастица (фуллерен) представлена в виде сплошной сферы S с поверхностной плотностью электрических диполей с электрическим моментом

$$\vec{p} = (f(\theta_0) \cos \phi_0, f(\theta_0) \sin \phi_0, g(\theta_0)), \quad \theta_0, \phi_0 - \text{сферические координаты на поверхности } S.$$

Получена система интегральных уравнений для вычисления электрического момента фуллера:

$$\vec{f}(\theta) + \int_0^\pi (K_{11}(\theta, \theta_0) \vec{f}(\theta_0) + K_{12}(\theta, \theta_0) \vec{g}(\theta_0)) d\theta_0 = \lambda_0(t) \cos \theta,$$

$$\vec{g}(\theta) + \int_0^\pi (K_{21}(\theta, \theta_0) \vec{f}(\theta_0) + K_{22}(\theta, \theta_0) \vec{g}(\theta_0)) d\theta_0 = \lambda_0(t) \sin \theta - \vec{c}_0(t) E_0.$$

Дифференциальные и интегральные уравнения решены аналитически. Вычислен электрический момент фуллера при воздействии высокочастотной электромагнитной волны. Получена формула эффективной диэлектрической проницаемости низкоразмерного композита из фуллеренов.

Ключевые слова: наночастица, фуллерен, электромагнитное поле, интегро-дифференциальная модель, композит.

V.T. Erofeenko

Research Institute for Applied Problems of Mathematics and Informatics, Belarusian State University, Minsk, Belarus

SIMULATION OF THE EFFECT OF HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVE ON FULLERENE

An integral-differential mathematical model of the fullerene C_{60} , consisted of 60 carbon atoms located on the surface of a sphere S of radius R , is developed. Shifts of 6 carbon electrons of two grades ($l = 1, 2$) when exposed to an electric field \vec{E} are described with the help of the oscillatory differential model

$$m_e \frac{d^2 \vec{r}_l}{dt^2} + \eta_l \frac{d \vec{r}_l}{dt} + k_l \vec{r}_l = e \vec{E} \exp(-i\omega t), \quad l = 1, 2,$$

where are m_e, e – mass and charge of the electron, η_l – friction coefficient, k_l – elasticity coefficient, \vec{r}_l – shift of the electron of grade l when exposed to an electric field.

The lattice-discrete nanoparticle (fullerene) is represented as a continuous sphere S with the surface density of the electrical dipoles with the electric moment

$$\vec{p} = (f(\theta_0)\cos\phi_0, f(\theta_0)\sin\phi_0, g(\theta_0)), \quad \theta_0, \phi_0 - \text{spherical coordinates on the surface } S.$$

A system of integral equations for calculating the electric moment of the fullerene is obtained:

$$\begin{aligned} \bar{f}(\theta) + \int_0^\pi (K_{11}(\theta, \theta_0)\bar{f}(\theta_0) + K_{12}(\theta, \theta_0)\bar{g}(\theta_0))d\theta_0 &= \lambda_0(t)\cos\theta, \\ \bar{g}(\theta) + \int_0^\pi (K_{21}(\theta, \theta_0)\bar{f}(\theta_0) + K_{22}(\theta, \theta_0)\bar{g}(\theta_0))d\theta_0 &= \lambda_0(t)\sin\theta - \bar{c}_0(t)E_0. \end{aligned}$$

The differential and integral equations are solved analytically. The electric moment of the fullerene under the action of high-frequency electromagnetic wave is calculated. A formula of the effective permittivity of the low-dimensional composite from fullerene is obtained.

Keywords: nanoparticle, fullerene, electromagnetic fields, integral-differential model, composite.

Введение. В последние десятилетия увеличилось число научных исследований и разработок природных и искусственных нанообъектов и материалов из них [1–6]. К нанообъектам относятся пространственные объекты, которые характеризуются наноразмерами хотя бы в одном из трех измерений, то есть являются низкоразмерными системами [5]. Актуальным является исследование композитных материалов, формируемых из нанообъектов различных типов. Особенность нанокompозитов заключается в том, что в них проявляются уникальные свойства, основанные на квантовых эффектах. Устойчивость нанообъектов базируется на электрических и магнитных силах, поэтому большое значение приобретают исследования электродинамики взаимодействия электромагнитных полей с наноматериалами и электродинамических свойств материалов. В [4] приводится значительный перечень литературных источников, отражающих основные направления исследований наноструктур. Уникальные свойства наноструктур и материалов из них определяют их практическое использование для создания устройств обработки информации в электронике, экранирующих пленочных структур, высокочувствительных сенсорных элементов, излучателей средств связи и другое [2, 7].

В настоящей статье разработана электродинамическая дипольная модель наночастицы (фуллерена) при воздействии высокочастотного электромагнитного поля. Математическая модель наночастицы составлена из обыкновенных дифференциальных уравнений и системы интегральных уравнений второго рода, аналитическое решение которых позволяет определить электрический момент частицы. Проведен анализ композита из случайно распределенных в пространстве фуллеренов, определена его диэлектрическая проницаемость.

Дипольная модель фуллерена. В пространстве R^3 рассмотрим наночастицу, представляющую собой большое число атомов углерода, расположенных на поверхности сферы радиуса R (рис. 1). Атомы углерода, состоящие из положительных и отрицательных электрических зарядов, при воздействии внешнего электромагнитного поля \vec{E}_0, \vec{H}_0 будем моделировать электрическими диполями с заданными электрическими моментами. Для перехода от дискретной структуры фуллерена к идеальной модели моменты диполей распределим равномерно по поверхности сферы с некоторой поверхностной плотностью. Таким образом, в результате моделирования фуллерен заменяется непрерывно распределенными по поверхности сферы электрическими диполями. Электромагнитное поле диполей определяет поле фуллерена. Для математической реализации модели в пространстве R^3 с электрической и магнитной постоянными ϵ_0, μ_0 на сфере S радиуса R распределим электрические диполи с поверхностным электрическим моментом $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)$ (рис. 2). Сфера S делит пространство R^3 на две области: $D_1 (0 < r < R)$, $D_2 (r > R)$. Зафиксируем декартову систему координат $Oxyz$, где O – центр сферы. Рассмотрим случай, когда диполи распределены с осевой симметрией вокруг оси Oz . Момент $\vec{p}(O_1)$, $O_1 \in S$, ориентирован в азимутальном направлении точки O_1 . Пусть $O_1x_1y_1z_1$ – система координат, параллельно сдвинутая относительно $Oxyz$. С декартовыми координатами

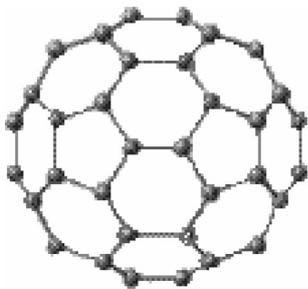


Рис. 1. Структура фуллерена C_{60}
Fig. 1. Structure of fullerene C_{60}

фуллерен заменяется непрерывно распределенными по поверхности сферы электрическими диполями. Электромагнитное поле диполей определяет поле фуллерена. Для математической реализации модели в пространстве R^3 с электрической и магнитной постоянными ϵ_0, μ_0 на сфере S радиуса R распределим электрические диполи с поверхностным электрическим моментом $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)$ (рис. 2). Сфера S делит пространство R^3 на две области: $D_1 (0 < r < R)$, $D_2 (r > R)$. Зафиксируем декартову систему координат $Oxyz$, где O – центр сферы. Рассмотрим случай, когда диполи распределены с осевой симметрией вокруг оси Oz . Момент $\vec{p}(O_1)$, $O_1 \in S$, ориентирован в азимутальном направлении точки O_1 . Пусть $O_1x_1y_1z_1$ – система координат, параллельно сдвинутая относительно $Oxyz$. С декартовыми координатами

связем соответствующие сферические координаты. $Or\theta\phi$, $O_1r_1\theta_1\phi_1$, θ_0, ϕ_0 – сферические координаты точки O_1 в системе $Or\theta\phi$; $p_x = f(\theta_0)\cos\phi_0$, $p_y = f(\theta_0)\sin\phi_0$, $p_z = g(\theta_0)$.

Представим электромагнитное поле диполей, расположенных в окрестности dS точки O_1 , $dS \in S$, через сферические базисные электромагнитные поля [8, с. 174]:

$$\begin{aligned} \vec{E}_d(\vec{r}_1, k_0) &= e_0(a_0\tilde{n}_{01}(\vec{r}_1, k_0) + a_{+1}\tilde{n}_{11}(\vec{r}_1, k_0) + \\ &+ a_{-1}\tilde{n}_{-11}(\vec{r}_1, k_0))dS, \\ \vec{H}_d(\vec{r}_1, k_0) &= h_0e_0(a_0\tilde{m}_{01}(\vec{r}_1, k_0) + a_{+1}\tilde{m}_{11}(\vec{r}_1, k_0) + \\ &+ a_{-1}\tilde{m}_{-11}(\vec{r}_1, k_0))dS, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$h_0 = \frac{k_0}{i\omega\mu_0} = \frac{1}{iZ_0}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, \quad k_0 = \frac{\omega}{c}, \quad e_0 = \frac{ik_0^3}{4\pi\epsilon_0};$$

$$a_0 = p_z = g(\theta_0), \quad a_{+1} = -\frac{1}{2}(p_x - ip_y) = -\frac{1}{2}f(\theta_0)e^{-i\phi_0},$$

$$a_{-1} = p_x + ip_y = f(\theta_0)e^{i\phi_0}, \quad a_m = \bar{a}_m e^{-im\phi_0}, \quad m = 0, \pm 1,$$

$$\bar{a}_{+1} = -\frac{1}{2}f(\theta_0), \quad \bar{a}_{-1} = f(\theta_0), \quad \bar{a}_0 = g(\theta_0), \quad dS = R^2 \sin\theta_0 d\theta_0 d\phi_0 = R^2 dS_0,$$

$0 \leq \theta_0 \leq \pi$, $0 \leq \phi_0 \leq 2\pi$; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота колебаний диполя; координатные функции $f(\theta_0)$, $g(\theta_0)$ задают распределение момента \vec{p} диполей на поверхности сферы.

На сферическую структуру воздействует электромагнитное поле \vec{E}_0, \vec{H}_0 , которое колеблется с частотой ω . В центре сферы поля принимают значения

$$\vec{E}_0(0) = (0, 0, E_0), \quad \vec{H}_0(0) = (H_{0x}, H_{0y}, 0). \quad (2)$$

Поле \vec{E}_0, \vec{H}_0 слабо изменяется в окрестности сферы, так как предполагается, что длина волны значительно больше диаметра сферы S . В связи с этим будем считать, что поле имеет значение (2) во всех точках сферы и воздействует на диполи.

В дальнейшем поле (1) выразим через регулярные сферические функции в сферической системе координат $Or\theta\phi$ в области D_1 , используя соответствующие теоремы сложения [8, с. 150]. Выберем разложение поля в форме, разработанной в [9]:

$$\vec{E}_d(\vec{r}_1, k_0) = e_0 \sum_{s=0}^{\infty} \sum_{p=-s}^s \left(A_{ps}^{(+)} \vec{e}_+ + A_{ps}^{(-)} \vec{e}_- + A_{ps}^{(0)} \vec{e}_z \right) U_s^P(\vec{r}, k_0) dS, \quad (3)$$

$$\vec{H}_d(\vec{r}_1, k_0) = h_0 e_0 \sum_{s=0}^{\infty} \sum_{p=-s}^s \left(B_{ps}^{(+)} \vec{e}_+ + B_{ps}^{(-)} \vec{e}_- + B_{ps}^{(0)} \vec{e}_z \right) U_s^P(\vec{r}, k_0) dS, \quad 0 \leq r < R,$$

где $\vec{e}_+ = i\vec{e}_y + \vec{e}_x$, $\vec{e}_- = i\vec{e}_y - \vec{e}_x$; $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ – орты декартовой системы координат,

$$A_{ps}^{(+)} = \sum_{m=-1}^1 \bar{a}_m A_{ps}^{m+}, \quad A_{ps}^{(-)} = \sum_{m=-1}^1 \bar{a}_m A_{ps}^{m-}, \quad A_{ps}^{(0)} = \sum_{m=-1}^1 \bar{a}_m A_{ps}^{m0},$$

$$B_{ps}^{(+)} = \sum_{m=-1}^1 \bar{a}_m B_{ps}^{m+}, \quad B_{ps}^{(-)} = \sum_{m=-1}^1 \bar{a}_m B_{ps}^{m-}, \quad B_{ps}^{(0)} = \sum_{m=-1}^1 \bar{a}_m B_{ps}^{m0},$$

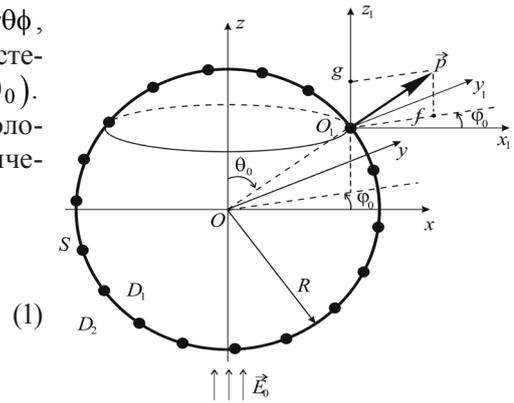


Рис. 2. Дипольная модель фуллерена в виде сплошной сферы

Fig. 2. Dipole model of fullerene in form of continuous sphere

$$A_{ps}^{m1+} = \frac{1}{6} \left[(2-m)(3-m) \bar{C}_{ps}^{m-1,2} - 2(1+m)m \bar{C}_{ps}^{m-1,0} \right] e^{-i(p+1)\phi_0},$$

$$A_{ps}^{m1-} = \frac{1}{6} \left[\bar{C}_{ps}^{m+1,2} - 2\bar{C}_{ps}^{m+1,0} \right] e^{-i(p-1)\phi_0}, \tag{4}$$

$$A_{ps}^{m10} = \frac{1}{3} \left[(2-m) \bar{C}_{ps}^{m,2} + 2(1+m) \bar{C}_{ps}^{m,0} \right] e^{-ip\phi_0},$$

$$B_{ps}^{m1+} = -\frac{i}{2} (1+m)(2-m) \bar{C}_{ps}^{m-1,1} e^{-i(p+1)\phi_0},$$

$$B_{ps}^{m1-} = \frac{i}{2} \bar{C}_{ps}^{m+1,1} e^{-i(p-1)\phi_0}, \quad B_{ps}^{m10} = -im \bar{C}_{ps}^{m,1} e^{-ip\phi_0},$$

$$\bar{C}_{ps}^{mn} = \frac{(2s+1)(s-p)!}{(s+p)!} \sum_{\delta=|s-n|}^{|s+n|} i^{\delta+s-n} b_{\delta}^{(nm\delta p)} (-1)^{\delta} h_{\delta}^{(1)}(k_0 R) P_{\delta}^{m-p}(\cos \theta_0), \tag{5}$$

$$U_s^P(\vec{r}, k_0) = j_s(k_0 r) P_s^P(\cos \theta) e^{ip\phi},$$

$j_s(x)$, $h_s^{(1)}(x)$ – сферические функции Бесселя, $P_s^P(x)$ – присоединенная функция Лежандра [10], $b_{\delta}^{(nm\delta p)}$ определены в [11, с. 232].

Электромагнитное поле внутри сферической наночастицы. Совокупность электрических диполей на поверхности сферы малых размеров будем рассматривать как наночастицу, моделирующую фуллерен. Для вычисления электромагнитного поля частицы просуммируем поля всех диполей на сфере. Для определения поля внутри частицы достаточно вычислить интеграл поля (3) по сфере S :

$$\vec{E}_R = \int_S \vec{E}_d = \frac{\alpha}{2\pi} \sum_{s=0}^{\infty} \sum_{p=-s}^s \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \left(A_{ps}^{(+)} \vec{e}_+ + A_{ps}^{(-)} \vec{e}_- + A_{ps}^{(0)} \vec{e}_z \right) dS_0 U_s^P(\vec{r}, k_0), \quad 0 \leq r < R,$$

$$\vec{H}_R = \int_S \vec{H}_d = h_0 \frac{\alpha}{2\pi} \sum_{s=0}^{\infty} \sum_{p=-s}^s \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \left(B_{ps}^{(+)} \vec{e}_+ + B_{ps}^{(-)} \vec{e}_- + B_{ps}^{(0)} \vec{e}_z \right) dS_0 U_s^P(\vec{r}, k_0),$$

$$\alpha = \frac{iR^2 k_0^3}{2\epsilon_0}, \quad dS_0 = \sin \theta_0 d\theta_0 d\phi_0.$$

Учитывая структуру коэффициентов (4), рассчитаем интегралы по переменной ϕ_0 , тогда для электрического поля \vec{E}_R получим представление внутри сферы S в области D_1 :

$$\vec{E}_R = \alpha \left(\sum_{s=1}^{\infty} \left(A_s^{(+)} U_s^{-1} \vec{e}_+ + A_s^{(-)} U_s^1 \vec{e}_- \right) + \sum_{s=0}^{\infty} A_s^{(0)} U_s^0 \vec{e}_z \right), \quad 0 \leq r < R, \tag{6}$$

где

$$A_s^{(+)} = \int_0^{\pi} \left(g \bar{C}_{-1s}^{-1,2} + f \left(2\bar{C}_{-1s}^{-2,2} - \frac{1}{6} \bar{C}_{-1s}^{0,2} + \frac{1}{3} \bar{C}_{-1s}^{0,0} \right) \right) \sin \theta_0 d\theta_0,$$

$$A_s^{(-)} = \int_0^{\pi} \frac{1}{6} \left(g \bar{C}_{1s}^{1,2} + f \left(\bar{C}_{1s}^{0,2} - 2\bar{C}_{1s}^{0,0} - \frac{1}{2} \bar{C}_{1s}^{2,2} \right) \right) \sin \theta_0 d\theta_0,$$

$$A_s^{(0)} = \int_0^{\pi} \left(\frac{2}{3} g \left(\bar{C}_{0s}^{0,2} + \bar{C}_{0s}^{0,0} \right) + f \left(\bar{C}_{0,0}^{1,2} - \frac{1}{6} \bar{C}_{0s}^{1,2} \right) \right) \sin \theta_0 d\theta_0.$$

Упростим модель, используя малость размеров частицы по отношению к длине волны. Имеем асимптотическую формулу $j_n(k_0R) \underset{k_0R \rightarrow 0}{\approx} \frac{2^n n!}{(2n+1)!} (k_0R)^n$ [10]. В дальнейшем в представлении (6) будем пренебрегать величинами второго порядка малости $(k_0R)^2 \approx 0$ ($j_n(k_0R) \approx 0$, $n \geq 2$). Тогда получим асимптотическую формулу поля внутри частицы:

$$\bar{E}_R = \alpha \left(A_1^{(+)} U_1^{-1} \bar{e}_+ + A_1^{(-)} U_1^1 \bar{e}_- + \left(A_0^{(0)} U_0^0 + A_1^{(0)} U_1^0 \right) \bar{e}_z \right) \quad \text{в } D_1, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} A_1^{(+),(-)} &= \int_0^\pi \left(gL^{(+),(-)}(\theta_0) + fK^{(+),(-)}(\theta_0) \right) \sin \theta_0 d\theta_0, \\ A_{0,1}^{(0)} &= \int_0^\pi \left(gL_{0,1}^{(0)}(\theta_0) + fK_{0,1}^{(0)}(\theta_0) \right) \sin \theta_0 d\theta_0; \\ L^{(+)} &= \bar{C}_{-11}^{-1,2}, \quad K^{(+)} = 2\bar{C}_{-11}^{-2,2} - \frac{1}{6}\bar{C}_{-11}^{0,2} + \frac{1}{3}\bar{C}_{-11}^{0,0}, \\ L^{(-)} &= \frac{1}{6}\bar{C}_{11}^{1,2}, \quad K^{(-)} = \frac{1}{6} \left(\bar{C}_{11}^{0,2} - 2\bar{C}_{11}^{0,0} - \frac{1}{2}\bar{C}_{11}^{2,2} \right), \\ L_0^{(0)} &= \frac{2}{3} \left(\bar{C}_{00}^{0,2} + \bar{C}_{00}^{0,0} \right), \quad K_0^{(0)} = \bar{C}_{00}^{-1,2} - \frac{1}{6}\bar{C}_{00}^{1,2}, \\ L_1^{(0)} &= \frac{2}{3} \left(\bar{C}_{01}^{0,2} + \bar{C}_{01}^{0,0} \right), \quad K_1^{(0)} = \bar{C}_{01}^{-1,2} - \frac{1}{6}\bar{C}_{01}^{1,2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Правые части равенств (8) вычисляются с помощью формулы (5) и формул, приведенных в [11, с. 232]:

$$\begin{aligned} \bar{C}_{-11}^{-1,2} &= -\frac{3}{5} \left(h_1^{(1)}(k_0R) P_1(\cos \theta_0) + h_3^{(1)}(k_0R) P_3(\cos \theta_0) \right), \\ \bar{C}_{-11}^{-2,2} &= -\frac{3}{5} \left(h_1^{(1)}(k_0R) P_1^{-1}(\cos \theta_0) + h_3^{(1)}(k_0R) P_3^{-1}(\cos \theta_0) \right), \\ \bar{C}_{-11}^{0,2} &= -\frac{3}{5} \left(h_1^{(1)}(k_0R) P_1^1(\cos \theta_0) + h_3^{(1)}(k_0R) P_3^1(\cos \theta_0) \right), \\ \bar{C}_{-11}^{0,0} &= -3h_1^{(1)}(k_0R) P_1^1(\cos \theta_0), \\ \bar{C}_{11}^{1,2} &= -\frac{9}{5} \left(h_1^{(1)}(k_0R) P_1(\cos \theta_0) + h_3^{(1)}(k_0R) P_3(\cos \theta_0) \right), \\ \bar{C}_{11}^{0,2} &= -\frac{3}{5} \left(h_1^{(1)}(k_0R) P_1^{-1}(\cos \theta_0) + 6h_3^{(1)}(k_0R) P_3^{-1}(\cos \theta_0) \right), \\ \bar{C}_{11}^{0,0} &= -3h_1^{(1)}(k_0R) P_1^{-1}(\cos \theta_0), \\ \bar{C}_{11}^{2,2} &= -\frac{3}{5} \left(6h_1^{(1)}(k_0R) P_1^1(\cos \theta_0) + h_3^{(1)}(k_0R) P_3^1(\cos \theta_0) \right), \\ \bar{C}_{00}^{0,2} &= h_2^{(1)}(k_0R) P_2(\cos \theta_0), \quad \bar{C}_{00}^{0,0} = h_0^{(1)}(k_0R), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{C}_{00}^{-1,2} &= h_2^{(1)}(k_0 R) P_2^{-1}(\cos \theta_0), \quad \bar{C}_{00}^{1,2} = h_2^{(1)}(k_0 R) P_2^1(\cos \theta_0), \\ \bar{C}_{01}^{0,2} &= -\frac{3}{5} \left(2h_1^{(1)}(k_0 R) P_1(\cos \theta_0) - 3h_3^{(1)}(k_0 R) P_3(\cos \theta_0) \right), \\ \bar{C}_{01}^{0,0} &= 3h_1^{(1)}(k_0 R) P_1(\cos \theta_0), \\ \bar{C}_{01}^{-1,2} &= -\frac{3}{5} \left(h_1^{(1)}(k_0 R) P_1^{-1}(\cos \theta_0) - 4h_3^{(1)}(k_0 R) P_3^{-1}(\cos \theta_0) \right), \\ \bar{C}_{01}^{1,2} &= -\frac{3}{5} \left(3h_1^{(1)}(k_0 R) P_1^1(\cos \theta_0) - 2h_3^{(1)}(k_0 R) P_3^1(\cos \theta_0) \right).\end{aligned}$$

Определим поле (7) на меридиане сферы S в точке $M_0(r = R, \theta, \phi = 0)$:

$$\begin{aligned}\vec{E}_R \Big|_{\substack{r=R \\ \phi=0}} &= \alpha \left[\left(\left(\frac{1}{2} A_1^{(+)} + A_1^{(-)} \right) \vec{e}_x + i \left(\frac{1}{2} A_1^{(+)} - A_1^{(-)} \right) \vec{e}_y \right) j_1(k_0 R) \sin \theta + \right. \\ &\quad \left. + \left(A_0^0 j_0(k_0 R) + A_1^{(0)} j_1(k_0 R) \cos \theta \right) \vec{e}_z \right].\end{aligned}$$

Учитывая (8), получим формулы:

$$L^{(+)} = -\frac{3}{2} \left(\frac{2}{k_0 R} h_2^{(1)}(k_0 R) - h_3^{(1)}(k_0 R) \sin^2 \theta_0 \right) \cos \theta_0,$$

$$K^{(+)} = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{k_0 R} h_2^{(1)}(k_0 R) - h_3^{(1)}(k_0 R) \cos^2 \theta_0 \right) \sin \theta_0,$$

$$L^{(-)} = -\frac{3}{4} \left(\frac{2}{k_0 R} h_2^{(1)}(k_0 R) - h_3^{(1)}(k_0 R) \sin^2 \theta_0 \right) \cos \theta_0,$$

$$K^{(-)} = \frac{3}{4} \left(\frac{1}{k_0 R} h_2^{(1)}(k_0 R) - h_3^{(1)}(k_0 R) \cos^2 \theta_0 \right) \sin \theta_0,$$

$$L_0^{(0)} = \frac{2}{k_0 R} h_1^{(1)}(k_0 R) - h_2^{(1)}(k_0 R) \sin^2 \theta_0,$$

$$K_0^{(0)} = h_2^{(1)}(k_0 R) \sin \theta_0 \cos \theta_0,$$

$$L_1^{(0)} = 3 \left(\frac{2}{k_0 R} h_2^{(1)}(k_0 R) - h_3^{(1)}(k_0 R) \sin^2 \theta_0 \right) \cos \theta_0,$$

$$K_1^{(0)} = -3 \left(\frac{1}{k_0 R} h_2^{(1)}(k_0 R) - h_3^{(1)}(k_0 R) \cos^2 \theta_0 \right) \sin \theta_0.$$

Легко показать, что $\frac{1}{2} A_1^{(+)} - A_1^{(-)} = 0$, так как $L^{(-)} = \frac{1}{2} L^{(+)}$, $K^{(-)} = \frac{1}{2} K^{(+)}$. В результате определим значение электрического поля (7), созданного всеми диполями частицы, на поверхности частиц S в точке $M_0(r = R, \theta, \phi = 0)$:

$$\vec{E}_R \Big|_{\substack{r=R \\ \phi=0}} = F(\theta) \vec{e}_x + G(\theta) \vec{e}_z, \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned}
 F(\theta) &= \alpha A_1^{(+)} j_1(\xi_0) \sin \theta = \alpha j_1(\xi_0) \sin \theta \int_0^{\pi} \left(g(\theta_0) L^{(+)}(\theta_0) + f(\theta_0) K^{(+)}(\theta_0) \right) \sin \theta_0 d\theta_0, \\
 G(\theta) &= \alpha \left(A_0^{(0)} j_0(\xi_0) + A_1^{(0)} j_1(\xi_0) \cos \theta \right) = \\
 &= \alpha \int_0^{\pi} \left[g(\theta_0) \left(j_0(\xi_0) L_0^{(0)}(\theta_0) + j_1(\xi_0) \cos \theta L_1^{(0)}(\theta_0) \right) + \right. \\
 &\left. + f(\theta_0) \left(j_0(\xi_0) K_0^{(0)}(\theta_0) + j_1(\xi_0) \cos \theta K_1^{(0)}(\theta_0) \right) \right] \sin \theta_0 d\theta_0.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Дифференциальная модель диполя при воздействии электромагнитного поля. Диполь, расположенный в точке $M_0(r = R, \theta, \phi = 0)$ на поверхности сферы S , подвергается воздействию электрического поля $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_R$, которое состоит из первичного поля (2) и поля, создаваемого другими диполями фуллера. Фуллерен C_{60} состоит из 60 атомов углерода, расположенных на поверхности S радиуса $R = 0,3512$ нм [3, с. 145]. Положительно заряженное ядро углерода имеет большую массу, поэтому при воздействии электромагнитного поля совершает незначительные перемещения, которыми будем пренебрегать. Смещения 6 электронов двух сортов в углероде при воздействии электрического поля будем учитывать. Обозначим: $\nu_l = N_l / \pi R^2$ – поверхностная концентрация электронов сорта l ($l = 1, 2$) на поверхности S , где N_l – число электронов сорта l на поверхности фуллера C_{60} ($N_1 = 120, N_2 = 240$). Смещения электронов под действием поля опишем с помощью осцилляторной модели [12, с. 128], представляющей собой дифференциальные уравнения:

$$m_e \frac{d^2 \vec{r}_l}{dt^2} + \eta_l \frac{d\vec{r}_l}{dt} + k_l \vec{r}_l = e \vec{E} \exp(-i\omega t), \quad l = 1, 2, \tag{11}$$

где m_e, e – масса и заряд электрона, η_l – коэффициент трения, k_l – коэффициент упругости, \vec{r}_l – смещение электрона сорта l под действием поля.

Разрешая уравнения (11), получим решение

$$\vec{r}_l = \vec{r}_l^0 - c_l \vec{E} \exp(-i\omega t), \quad l = 1, 2, \tag{12}$$

где $\vec{r}_l^0 = \vec{\alpha}_l e^{\lambda_l^{(1)} t} + \vec{\beta}_l e^{\lambda_l^{(2)} t}$ – общее решение однородного уравнения (11); $\vec{\alpha}_l, \vec{\beta}_l$ – произвольные векторы,

$$\lambda_l^{(1),(2)} = -\frac{\gamma_l}{2} \pm \sqrt{\frac{\gamma_l^2}{4} - \omega_l^2}, \quad c_l = \frac{e}{m_e (\omega^2 - \omega_l^2 + i\omega\gamma_l)},$$

$\omega_l = \sqrt{\frac{k_l}{m_e}}$ – частота собственных колебаний, $\gamma_l = \frac{\eta_l}{m_e}$ – декремент затухания. Векторы $\vec{\alpha}_l, \vec{\beta}_l$ определим из начальных условий:

$$\vec{r}_l^0 \Big|_{t=0} = \vec{R}_l, \quad \frac{d\vec{r}_l^0}{dt} \Big|_{t=0} = 0, \tag{13}$$

где $\vec{R}_l = R_l \vec{r}_0$ – начальное отклонение электрона l -го типа, $\vec{r}_0 = \cos \theta \vec{e}_x + \sin \theta \vec{e}_z$.

Из условий (13) следует, что

$$\vec{\alpha}_l = \alpha_l \vec{r}_0, \quad \vec{\beta}_l = \beta_l \vec{r}_0, \tag{14}$$

$$\alpha_l = \frac{\lambda_l^{(2)} R_l}{\lambda_l^{(2)} - \lambda_l^{(1)}}, \quad \beta_l = -\frac{\lambda_l^{(1)} R_l}{\lambda_l^{(2)} - \lambda_l^{(1)}}.$$

Система интегральных уравнений. Для вычисления электрического момента фуллерена построим интегральные уравнения. Учитывая (12), определим поверхностный электрический момент диполей сорта l на поверхности S в точке M_0 на основании формулы $\vec{p}_l = ev_l \vec{r}_l$. С учетом (2), (9), (14) определим суммарный электрический поверхностный момент в точке M_0 :

$$\begin{aligned} \vec{p}(\theta) &= \vec{f}(\theta) \vec{e}_x + \vec{g}(\theta) \vec{e}_z = \sum_{l=1}^2 \vec{p}_l = \sum_{l=1}^2 ev_l \left(\vec{r}_l^0 - c_l e^{-i\omega t} \vec{E} \Big|_{\phi=0}^{r=R} \right) = \\ &= \sum_{l=1}^2 ev_l \left[\left(\alpha_l e^{\lambda_l^{(1)} t} + \beta_l e^{\lambda_l^{(2)} t} \right) \vec{r}_0 + c_l e^{-i\omega t} \vec{E} \Big|_{\phi=0}^{r=R} \right] = \\ &= \lambda_0(t) \vec{r}_0 - c_0 \left(\vec{E}_R \Big|_{\phi=0}^{r=R} + \vec{E}_0 \right) = \lambda_0(t) (\cos \theta \vec{e}_x + \sin \theta \vec{e}_z) - \\ &\quad - \bar{c}_0(t) (F(\theta) \vec{e}_x + (G(\theta) + E_0) \vec{e}_z), \end{aligned} \tag{15}$$

где

$$\begin{aligned} \lambda_0(t) &= e \sum_{l=1}^2 v_l \left(\alpha_l e^{\lambda_l^{(1)} t} + \beta_l e^{\lambda_l^{(2)} t} \right), \quad c_0 = e(v_1 c_1 + v_2 c_2), \\ (\vec{E}_R, \vec{E}_0, \bar{c}_0, \vec{f}, \vec{g}) &= (\vec{E}_R, \vec{E}_0, c_0, f, g) e^{-i\omega t}. \end{aligned} \tag{16}$$

Сравнение правой и левой частей равенства (15) приводит к соотношениям

$$f(\theta) = \lambda_0(t) \cos \theta - \bar{c}_0(t) F(\theta), \quad g(\theta) = \lambda_0(t) \sin \theta - \bar{c}_0(t) (G(\theta) + E_0).$$

Подставляя сюда интегралы (10), получим систему интегральных уравнений

$$\vec{f}(\theta) + \int_0^\pi (K_{11}(\theta, \theta_0) \vec{f}(\theta_0) + K_{12}(\theta, \theta_0) \vec{g}(\theta_0)) d\theta_0 = \lambda_0(t) \cos \theta, \tag{17}$$

$$\vec{g}(\theta) + \int_0^\pi (K_{21}(\theta, \theta_0) \vec{f}(\theta_0) + K_{22}(\theta, \theta_0) \vec{g}(\theta_0)) d\theta_0 = \lambda_0(t) \sin \theta - \bar{c}_0(t) E_0,$$

где

$$\begin{aligned} K_{11}(\theta, \theta_0) &= \bar{j}_1(\xi_0) K^{(+)}(\theta_0) \sin \theta_0 \sin \theta, \quad K_{12}(\theta, \theta_0) = \bar{j}_1(\xi_0) L^{(+)}(\theta_0) \sin \theta_0 \sin \theta, \\ K_{21}(\theta, \theta_0) &= \left(\bar{j}_1(\xi_0) K_0^{(0)}(\theta_0) + \bar{j}_1(\xi_0) K_1^{(0)}(\theta_0) \cos \theta \right) \sin \theta_0, \\ K_{22}(\theta, \theta_0) &= \left(\bar{j}_0(\xi_0) L_0^{(0)}(\theta_0) + \bar{j}_1(\xi_0) L_1^{(0)}(\theta_0) \cos \theta \right) \sin \theta_0, \\ \bar{j}_0(\xi_0) &= c_0 \alpha j_0(\xi_0), \quad \bar{j}_1(\xi_0) = c_0 \alpha j_1(\xi_0). \end{aligned} \tag{18}$$

Структура подынтегральных функций (18) показывает, что решение уравнений (17) имеет вид

$$f(\theta) = b_1 \cos \theta + b_2 \sin \theta, \quad g(\theta) = b_3 + b_4 \cos \theta + b_5 \sin \theta. \tag{19}$$

Подставляя (19) в (17) и приравнявая коэффициенты при функциях $\cos \theta, \sin \theta$, получим систему алгебраических уравнений для определения коэффициентов b_m :

$$b_m + \sum_{n=1}^5 c_{mn} b_n = F_m, \quad m = 1, 2, 3, 4, 5, \tag{20}$$

где

$$F_1 = \lambda_0, \quad F_2 = 0, \quad F_3 = -\bar{c}_0 E_0, \quad F_4 = 0, \quad F_5 = \lambda_0.$$

Диэлектрическая проницаемость композита из фуллеренов. Вычислим матричные коэффициенты c_{mn} системы (20). Из структуры уравнений (17) и функций (18) следует $c_{1n} = 0$, $c_{5n} = 0$, $n = \overline{1, 5}$, тогда, разрешая первое и пятое уравнения (20), получаем $b_1 = b_5 = \lambda_0$. Для матричных коэффициентов при вычислении интегралов получим формулы:

$$c_{21} = \bar{j}_1 \int_0^\pi K^{(+)} \sin \theta_0 \cos \theta_0 d\theta_0 = 0, \quad c_{23} = \bar{j}_1 \int_0^\pi L^{(+)} \sin \theta_0 d\theta_0 = 0,$$

$$c_{25} = \bar{j}_1 \int_0^\pi L^{(+)} \sin^2 \theta_0 d\theta_0 = 0, \quad c_{24} = -c_{22}, \quad (21)$$

$$c_{22} = \bar{j}_1 \int_0^\pi K^{(+)} \sin^2 \theta_0 d\theta_0 = \frac{2}{5} \bar{j}_1 \left(\frac{5}{\xi_0} h_2^{(1)}(\xi_0) - h_3^{(1)}(\xi_0) \right) = \frac{2}{5} \bar{j}_1 h_1^{(1)}(\xi_0),$$

$$c_{32} = \bar{j}_0 \int_0^\pi K_0^{(0)} \sin^2 \theta_0 d\theta_0 = 0, \quad c_{34} = \bar{j}_0 \int_0^\pi L_0^{(0)} \sin \theta_0 \cos \theta_0 d\theta_0 = 0,$$

$$c_{31} = \bar{j}_0 \int_0^\pi K_0^{(0)} \sin \theta_0 \cos \theta_0 d\theta_0 = \frac{\pi}{8} \bar{j}_0 h_2^{(1)}(\xi_0),$$

$$c_{33} = \bar{j}_0 \int_0^\pi L_0^{(0)} \sin \theta_0 d\theta_0 = \frac{4}{3} \bar{j}_0 \left(\frac{3}{\xi_0} h_1^{(1)}(\xi_0) - h_2^{(1)}(\xi_0) \right) = \frac{4}{3} \bar{j}_0 h_0^{(1)}(\xi_0),$$

$$c_{35} = \bar{j}_0 \int_0^\pi L_0^{(0)} \sin^2 \theta_0 d\theta_0 = \pi \left(\frac{1}{\xi_0} h_1^{(1)}(\xi_0) - \frac{3}{8} h_2^{(1)}(\xi_0) \right),$$

$$c_{41} = \bar{j}_1 \int_0^\pi K_1^{(0)} \sin \theta_0 \cos \theta_0 d\theta_0 = 0, \quad c_{43} = \bar{j}_1 \int_0^\pi L_1^{(0)} \sin \theta_0 d\theta_0 = 0,$$

$$c_{45} = \bar{j}_1 \int_0^\pi L_1^{(0)} \sin^2 \theta_0 d\theta_0 = 0,$$

$$c_{44} = \bar{j}_1 \int_0^\pi L_1^{(0)} \sin^2 \theta_0 \cos \theta_0 d\theta_0 = \frac{4}{5} \bar{j}_1 \left(\frac{5}{\xi_0} h_2^{(1)}(\xi_0) - h_3^{(1)}(\xi_0) \right) = \frac{4}{5} \bar{j}_1 h_1^{(1)}(\xi_0),$$

$$c_{42} = -c_{44} = -2c_{22}.$$

Формулы (21) значительно упрощают систему уравнений (20). Из третьего уравнения (20) при $m = 3$ следует

$$b_3 = -\frac{\bar{c}_0 E_0 + (c_{31} + c_{35}) \lambda_0}{1 + c_{33}}. \quad (22)$$

Второе и четвертое уравнения (20) с номерами $m = 2$ и $m = 4$ образуют систему для определения величин b_2, b_4 :

$$(1 + c_{22}) b_2 - c_{22} b_4 = 0, \quad c_{44} b_2 - (1 + c_{44}) b_4 = 0.$$

Следует $b_2 = b_4 = 0$, так как определитель системы уравнений не равен нулю.

Используя решения системы (20), вычислим функции (19) и поверхностный момент:

$$\vec{p}(\theta) = f(\theta)\vec{e}_x + g(\theta)\vec{e}_z = \lambda_0 \cos \theta \vec{e}_x + (b_3 + \lambda_0 \sin \theta)\vec{e}_z.$$

Для определения суммарного момента всех диполей, сосредоточенных на поверхности S , вычислим интеграл по поверхности S (электрический момент фуллера):

$$\vec{P}_\Phi = \int_S \vec{p} dS = R^2 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \vec{p}(\theta) \sin \theta d\theta d\phi = \pi R^2 (4b_3 + \pi \lambda_0) \vec{e}_z.$$

Заметим, что функция $\lambda_0(t)$ (16) экспоненциально затухает при увеличении времени ($\lambda_0(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$). Поэтому для упрощения модели положим $\lambda_0(t) \approx 0$. В результате, учитывая (16), (22), получаем

$$\vec{P}_\Phi = \vec{P}_\Phi e^{-i\omega t} = 4\pi R^2 b_3 \vec{e}_z = -\frac{4\pi R^2 e(v_1 c_1 + v_2 c_2)}{1 + c_{33}} E_0 e^{-i\omega t} \vec{e}_z.$$

Рассмотрим композит, состоящий из случайно размещенных в пространстве одинаковых наночастиц (фуллеренов), которые распределены с концентрацией ν (число частиц в единице объема). Электрическая поляризация композита определяется соотношением $\vec{P} = \nu \vec{P}_\Phi$, а электрическая индукция – формулой $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_0 + \vec{P}$, $\vec{E}_0 = E_0 \vec{e}_z$. В развернутом виде получим формулу

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}_0 = \epsilon_0 \left(1 - 4\pi R^2 \frac{\nu e(v_1 c_1 + v_2 c_2)}{\epsilon_0 (1 + c_{33})} \right) \vec{E}_0. \quad (23)$$

Теорема. Относительная диэлектрическая проницаемость композита определяется формулой

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\tau}{h(\omega)} \sum_{l=1}^2 \frac{\omega_p^2 f_l}{\omega^2 - \omega_l^2 + i\omega\gamma_l}, \quad (24)$$

где

$$h(\omega) = 1 + \sin(k_0 R) e^{ik_0 R} \sum_{l=1}^2 \frac{\omega\omega_0}{\omega^2 - \omega_l^2 + i\omega\gamma_l}, \quad (25)$$

$$\omega_0 = \frac{2e^2 N}{3\pi c \epsilon_0 m_e R^2}, \quad \omega_p = \frac{e}{R} \sqrt{\frac{3N}{\pi \epsilon_0 m_e R}}, \quad f_l = \frac{N_l}{N},$$

$$f_1 = \frac{1}{3}, \quad f_2 = \frac{2}{3}, \quad \omega_0 = 6,62 \cdot 10^{15}, \quad \omega_p = 1,65 \cdot 10^{17},$$

$\tau = \frac{4\pi}{3} R^3 \nu$ – объемный коэффициент заполнения пространства сферическими частицами (суммарный объем частиц в единице объема пространства, $0 < \tau < 0,5$).

Доказательство. Преобразуем формулу (23), используя (21):

$$h(\omega) = 1 + c_{33} = 1 + \frac{4}{3} j_0 h_0^{(1)}(\xi_0) = 1 + \frac{4}{3} \alpha c_0 j_0(\epsilon_0) h_0^{(1)}(\xi_0) = 1 + i \frac{2c_0}{3\epsilon_0} R^2 k_0^3 j_0(\xi_0) h_0^{(1)}(\xi_0).$$

Имеем $j_0(\xi_0) h_0^{(1)}(\xi_0) = -\frac{i}{k_0^2 R^2} \sin(k_0 R) e^{ik_0 R}$.

Учитывая (16), получим

$$h(\omega) = 1 + \sin(k_0 R) e^{ik_0 R} \frac{\omega 2e^2 N}{3\pi c \epsilon_0 m_e R^2} \sum_{l=1}^2 \frac{N_l}{N(\omega^2 - \omega_l^2 + i\omega\gamma_l)}.$$

Введем обозначения $\omega_0 = \frac{2e^2 N}{3\pi c \varepsilon_0 m_e R^2}$, $f_l = \frac{N_l}{N}$, получим искомую формулу (25). Далее преобразуем выражение из формулы (23):

$$A = 4\pi R^2 v \frac{e}{\varepsilon_0} \sum_{l=1}^2 v_l c_l = 4v \frac{e}{\varepsilon_0} \sum_{l=1}^2 N_l c_l = \frac{3eN\tau}{\pi \varepsilon_0 R^3} \sum_{l=1}^2 f_l c_l = \frac{3e^2 N \tau}{\pi \varepsilon_0 m_e R^3} \sum_{l=1}^2 \frac{1}{\omega^2 - \omega_l^2 + i\omega\gamma_l}. \quad \text{Обозначим}$$

$$\omega_p^2 = \frac{3e^2 N}{\pi \varepsilon_0 m_e R^3}, \quad \text{тогда } A = \tau \sum_{l=1}^2 \frac{\omega_p^2 f_l}{\omega^2 - \omega_l^2 + i\omega\gamma_l}. \quad \text{Получена требуемая формула (24).}$$

Следствие. Для низких частот ($\omega < 10^{14}$) формула (25) принимает вид

$$h(\omega) = 1 + \beta \sum_{l=1}^2 \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega_l^2 + i\omega\gamma_l},$$

где $\beta = \frac{R}{c} \omega_0 = 7,72 \cdot 10^{-3}$.

Для доказательства в соотношении (25) воспользуемся асимптотическими формулами:

$$\sin(k_0 R) \approx k_0 R = \omega \frac{R}{c}, \quad e^{ik_0 R} \approx 1, \quad \text{так как } k_0 R < 1,17 \cdot 10^{-4}.$$

Заключение. Разработана интегрально-дифференциальная аналитическая модель наноразмерной частицы (фуллерена). В результате дискретно-структурная частица, состоящая из 60 атомов углерода, которые образуют сферическую структуру, заменена на сплошную сферу, на которой с поверхностной плотностью распределены электрические диполи. При этом атомы углерода моделируются двумя типами диполей в соответствии с двумя уровнями электронов, расположенных на орбитах атомов. Колебания электрических моментов диполей при воздействии высокочастотного электромагнитного поля описаны двумя обыкновенными дифференциальными уравнениями второго порядка (осцилляторная модель). Для вычисления поверхностной плотности электрических моментов на поверхности сферы построена система интегральных уравнений, которая решена аналитически. Аналитическое решение дифференциальных и интегральных уравнений позволило вычислить электрический момент фуллерена при воздействии электромагнитного поля заданной частоты, что в свою очередь позволило определить эффективную диэлектрическую проницаемость композита из фуллеренов и представить в виде достаточно простой формулы.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований «Информатика и космос» задание 1.21 (№ 20140541), Республика Беларусь.

Acknowledgement

The author's research was supported by the State Program of Research "Informatics and cosmos" task 1.21 (no. 20140541), Republic of Belarus.

Список использованных источников

1. Виноградов, А. П. Электродинамика композитных материалов / А. П. Виноградов. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 208 с.
2. Витязь, П. А. Основы нанотехнологий и наноматериалов / П. А. Витязь, Н. А. Свидуневич. – Минск: Выш. шк., 2010. – 304 с.
3. Наноматериалы и нанотехнологии / В. М. Анищик [и др.]. – Минск: Изд. центр БГУ, 2008. – 373 с.
4. Федосюк, В. М. Наноструктурные пленки и нанопроволоки / В. М. Федосюк. – Минск: Изд. центр БГУ, 2006. – 311 с.
5. Borisenko, V. E. What is what in the nanoworld / V. E. Borisenko, S. Ossicini. – Wiley-VCH, Weinheim, 2004. – 335 p.
6. Зеленковский, В. М. Теоретическое исследование взаимодействия молекул водорода с фуллереном / В. М. Зеленковский, А. Г. Уляшин, А. Л. Пушкачук // Низкоразмерные системы: физические основы получения, диагностики, функционирования и применения низкоразмерных элементов и систем. – Минск: БГУ, 1999. – С. 48–51.

7. Шпилевский, М. Э. Фуллерены и фуллереноподобные структуры – основа перспективных материалов / М. Э. Шпилевский, Э. М. Шпилевский, В. Ф. Стельмах // Инженер.-физ. журн. – 2001. – Т. 74. № 6. – С. 106–112.
8. Ерофеенко, В. Т. Аналитическое моделирование в электродинамике / В. Т. Ерофеенко, И. С. Козловская. – Минск: БГУ, 2010. – 304 с.
9. Ерофеенко, В. Т. Модель вычисления эффективных параметров матричного композита из биизотропных частиц с учетом многократных переотражений электромагнитного поля / В. Т. Ерофеенко // Информатика. – 2015. – № 4. – С. 17–33.
10. Справочник по специальным функциям / под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 831 с.
11. Ерофеенко, В. Т. Теоремы сложения / В. Т. Ерофеенко. – Минск: Наука и техника, 1989. – 256 с.
12. Памятных, Е. А. Основы электродинамики материальных сред в переменных и неоднородных полях / Е. А. Памятных, Е. А. Туров. – М.: Наука, 2000. – 240 с.

References

1. Vinogradov A.P. *Electrodynamics of composite materials*. Moscow, Editorial URSS, 2001. 208 p. (In Russian).
2. Vityaz P.A., Svidunovich N.A. *Basis of nanotechnologies and nanomaterials*. Minsk, Visheishaya shkola Publ., 2010. 304 p. (In Russian).
3. Anishchik V.M., Borisenko V.E., Zhdanok S.A., Tolochko N.K., Fedosyuk V.M. *Nanomaterials and nanotechnologies*. Minsk, Publishing Center of the Belarusian State University, 2008. 373 p. (In Russian).
4. Fedosyuk V.M. *Nanostructural films and nanowires*. Minsk, Publishing Center of the Belarusian State University, 2006. 311 p. (In Russian).
5. Borisenko V.E., Ossicini S. What is what in the nanoworld. Weinheim, Wiley-VCH, 2004. 335 p. Doi:10.1002/9783527618606
6. Zelenkovskii V.M., Ulyashin A.G., Pushkarshuk A.L. Theoretical investigation of interaction of hydrogen molecule with fullerene. *Nizkorazmernye sistemy: fizicheskie osnovy polucheniya, diagnostiki, funktsionirovaniya i primeneniya nizkorazmernykh elementov i sistem* [Low-dimensional systems: Physical basis of obtaining, diagnosis, functioning and application of low-dimensional elements and systems]. Minsk, Belarusian State University, 1999, pp. 48–51. (In Russian).
7. Shpilevsky M.E., Shpilevsky E.M., Stel'makh V.F. Fullerenes and fullerene-like structures: the basis for promising materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2001, vol. 74, no. 6, pp. 1499–1508.
8. Erofeenko V.T., Kozlovskaya I.S. *Analytical modeling in electrodynamics*. Minsk, Belarusian State University, 2010. 304 p. (In Russian).
9. Erofeenko V.T. Model for calculating effective parameters of matrix composites from bi-isotropic particles with regard to multiple reflections of electromagnetic field. *Informatika* [Informatics], 2015, no. 4, pp. 17–33. (In Russian).
10. Abramowitz M., Stegun I. (eds.). *Handbook of special functions*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 831 p. (In Russian).
11. Erofeenko V.T. *Addition theorems*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1989. 256 p. (In Russian).
12. Pamyatnykh E.A., Turov E.A. *Basis of electrodynamics of material mediums in variable and inhomogeneous fields*. Moscow, Nauka Publ., 2000. 240 p. (In Russian).

Информация об авторе

Ерофеенко Виктор Тихонович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории математических методов защиты информации, Учреждение Белорусского государственного университета «НИИ прикладных проблем математики и информатики» (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bsu_erofeenko@tut.by

Information about the authors

Erofeenko Viktor Tikhonovich – Dr. Sc. (Physical and Mathematics), Professor, Chief Research Associate of the Research Laboratory of Mathematical Methods of Information Security, Research Institute for Applied Problems of Mathematics and Informatics, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bsu_erofeenko@tut.by

Для цитирования

Ерофеенко, В. Т. Моделирование воздействия высокочастотной электромагнитной волны на фуллерен / В. Т. Ерофеенко // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 103–114.

For citation

Erofeenko V.T. Simulation of the effect of high frequency electromagnetic wave on fullerene. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 103–114. (In Russian).

Н. К. Артюхина*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь***МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РАСЧЕТА НОВОЙ КОМПОЗИЦИИ
ЗЕРКАЛЬНОГО ПЛАНАНАСТИГМАТА**

Представлена методика расчета четырехзеркальных плананастигматов. Конструктивной особенностью новой зеркальной композиции является наличие афокальной схемы из первых двух зеркал и моноблока из 1-го и 4-го зеркала, оправа которого является апертурной диафрагмой. Исследованы различные варианты конструктивного решения, даны параметрические характеристики модулей, описаны aberrации в области Зейделя и получены формулы aberrационных полиномов третьего порядка. Установлены параметры коррекции сферической aberrации, комы и астигматизма. Исправление aberrаций достигается асферизацией профиля зеркальных поверхностей. Обсужден вопрос план-коррекции анастигматов, проведен классификационный анализ схем с целью получения плоского поля изображения. Разработана модель aberrационного параметрического алгоритма для расчета новой зеркальной композиции плананастигмата с двойным зеркалом. Дана сводка основных конструктивных параметров системы. Исследован вопрос защиты плоскости изображения от попадания постороннего света.

Разработан светосильный четырехзеркальный объектив (относительное отверстие $D/f \approx 1 : 1$) с увеличенным углом поля зрения (до $2\omega = 15^\circ$). Система обладает стабильной коррекцией aberrаций по полю: в плоскости установки кружок рассеяния равен 0,01 мм в центре и не превышает 0,05 мм с небольшим фоном выше этого предела на краю. Кривизна изображения исправлена, величина астигматизма не превышает 0,05 мм. Отсутствие хроматических aberrаций, наличие высокой разрешающей способности и приемлемые условия для размещения приемной аппаратуры в новой композиции зеркального плананастигмата открывают широкие возможности по ее применению. Объектив может использоваться в тепловидении, оптических приборах, работающих в инфракрасной области спектра.

Ключевые слова: оплотехника, зеркальные системы, коррекция aberrаций, оптимизация, расчет оптических схем, анастигматический объектив, афокальная схема, сводка основных параметров системы, качество изображения.

N.K. Artioukhina*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus***PARAMETRICAL CALCULATION TECHNIQUE
OF THE NEW MIRROR PLANANASTIGMAT COMPOSITION**

A four-mirror planaanastigmat calculation method is presented. Design feature of new mirror composition is existence of the afocal scheme from the first two mirrors. The first and fourth mirrors can be combined into one unit (double mirror) which frame is an objective aperture. Different variants of designs are found; parametric characteristics of various modules are given. Seidel coefficients are described and the formulas of third order aberration polynomials are obtained. The correction factors of spherical aberration, coma, astigmatism are determined. Aberration correction is carried out at the expense of an asferization of smooth surfaces. The plane – field anastigmats are discussed; classification analysis by type of circuit decisions is executed for the purpose of obtaining a flat image field. A model of aberrational parametric algorithm of a new mirror plane – field anastigmat composition with a double mirror is developed. The system summary graphic and design factors have been presented. The problem on protection of the image plane from the foreign light has been considered.

A light-gathering system (relative aperture $D/f \approx 1 : 1$) consisting of four mirrors with a large field of view (near $2\omega = 15^\circ$) has been developed. The system proposed provides a stable correction of aberrations in the field of view: in the setup plane, the circle of confusion is equal to 0.1 mm at the center and does not exceed 0.05 mm, with a small back-ground exceeding this limit at the edge. The image curvature is corrected and the astigmatism does not exceed 0.05 mm. The absence of chromatic aberrations, high resolving power, and acceptable conditions for disposition of receiving apparatus in the new mirror planaanastigmat composition proposed allow it to be widely used. The objective proposed can be used in thermal imaging as well as optical devices operating in the infrared region of the spectrum.

Keywords: calculation optics, mirror systems, aberration correction, an optimization, optical design, anastigmat, refresh extension list, objective, afocal scheme, system summary graphic, image quality.

Введение. Зеркальные системы исследуются и используются в астрономической оптике, оптико-электронной аппаратуре дистанционного зондирования Земли из космоса и ряде других приложений. Область применения непрерывно расширяется и к системам предъявляются все бо-

лее высокие требования [1]. Различные концепции, связанные с проектированием зеркальных систем, освещены в работах российских и зарубежных ученых, таких как В. Н. Чуриловский, Д. Д. Максутов, Н. Н. Михельсон, Ю. Д. Пименов, Д. Т. Пуряев, Г. И. Цуканова, D. G. Korsh, A. V. Meinel, J. M. Sasian и др. Целый ряд проблем, касающихся габаритного и абберационного расчета зеркальных схем, требуют дальнейшего исследования: канонические схемы имеют исправленную сферическую абберацию и кому, поле зрения которых ограничено астигматизмом [2, 3]. Увеличение числа зеркал приводит к увеличению числа элементов для коррекции аббераций с целью получения необходимого качества изображения. Правильный выбор базовой схемы с заданными оптическими характеристиками имеет определяющее значение для успешной реализации поставленной задачи. Недостатком трехзеркальных систем является неудобное расположение приемника изображения; для анастигматической коррекции вводят асферические профили высокого порядка на всех трех зеркалах, что создает определенные технологические трудности.

Анастигматы из четырех зеркал светосильны и широкоугольны, имеют удачную конструктивную компоновку [4]. По коррекции аббераций их классифицируют как анастигматы; плананастигматы и системы с исправленной дисторсией – ортоскопические. В конфигурациях многозеркальных систем, использующих концепцию двухступенчатой оптики, интересны исследования схем с выносом зеркального полевого корректора из двух последних зеркал за пределы системы, что дает возможность развить поле зрения. Классическими схемами являются базовые канонические системы с двухзеркальными компенсаторами; к числу новых направлений можно отнести катоптрические объективы с двойным зеркалом [5].

Цель работы – дальнейшее исследование зеркальных композиций с моноблоком из двух зеркал (1-го и 4-го по ходу светового пучка) и развитие расчетно-методической базы для моделирования новых композиций зеркальных плананастигматов.

Оптехника зеркальной плананастигматической композиции. Для расчета конструктивных параметров и сравнительного абберационного анализа оптических модулей анастигматов разработана методика, устанавливающая новый подход к созданию схемных решений четырехзеркальных композиций с использованием наиболее рациональных черт проектирования и новых стадий моделирования, таких как классификация систем и параметрический синтез [6].

Описание композиции и модель параметрического алгоритма. На рис. 1 представлена базовая четырехзеркальная композиция с моноблоком из двух зеркал;

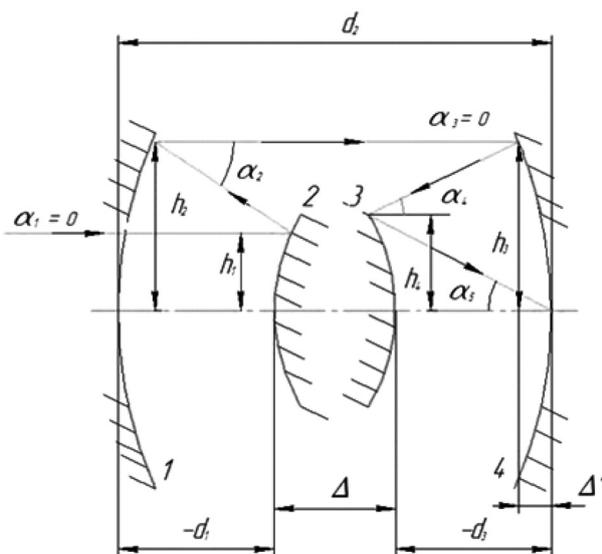


Рис. 1. Базовый модуль с афокальной схемой из первых двух зеркал

Fig. 1. The base module with the afocal scheme from the first two mirrors

указаны параметры нулевого луча (углы α_s и высоты h_s). Конструктивные особенности оптической схемы следующие:

эквивалентная фокальная плоскость совпадает с вершиной 3-го зеркала;

апертурной диафрагмой является оправа двойного зеркала;

1-е выпуклое и 2-е вогнутое зеркала образуют афокальную систему ($\alpha_3 = 0$, $h_2 = h_3$);

2-е и 3-е зеркала имеют центральные отверстия для прохождения пучка лучей;

нет действительных промежуточных изображений по ходу луча после 2-го зеркала ($h_3 > 0$, $h_4 > 0$).

Такое схемное решение позволяет увеличить поле зрения по сравнению с аналогичными зеркальными системами до $2\omega = 15^\circ$ при сохранении высокой светосилы (относительное отверстие D/f' порядка 1 : 1) и построить изображение предмета на плоском поле.

Задачей параметрического расчета является создание оптического модуля в тонких ком-

понентах. Методика опирается на основные формулы алгоритма проектного расчета композиции, состоящего из последовательности этапов.

На I этапе:

введены условия нормировки (координаты 1-го и 2-го нулевых лучей): $\alpha_1 = 0$; $h_1 = 1$; $\beta_1 = 1$; $\alpha_5 = 1$ для относительного эквивалентного фокусного расстояния $f' = 1$;

предложены формулы расчета параметрических характеристик (относительных значений радиусов r и толщин d); составлен базовый параметрический модуль, данные которого приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Ф о р м у л ы о т н о с и т е л ь н ы х в е л и ч и н к о н с т р у к т и в н ы х п а р а м е т р о в с и с т е м ы
 T a b l e 1. F o r m u l a s f o r r e d u c e d v a l u e s o f t h e d e s i g n p a r a m e t e r s o f t h e s y s t e m

Номер поверхности	r_s	d_s
1	$\frac{2}{\alpha_2}$	$\frac{1-h_2}{\alpha_2}$
2	$\frac{2(1-\alpha_2 d_1)}{\alpha_2 + \alpha_3}$	$\frac{h_2 - h_3}{\alpha_3}$
3	$\frac{2(1-\alpha_2 d_1 - \alpha_3 d_2)}{\alpha_3 + \alpha_4}$	$\frac{h_3 - h_4}{\alpha_4}$
4	$\frac{2(1-\alpha_2 d_1 - \alpha_3 d_2 - \alpha_4 d_2)}{\alpha_4 + \alpha_5}$	–

На II этапе в алгоритм параметрического расчета вводим:

1) толщину моноблока из 1-го и 4-го зеркал в зависимости от относительного отверстия D/f' объектива:

$$\Delta = \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{10} \right) \frac{h_1}{D} f';$$

2) габаритные ограничения для осевых расстояний между вершинами зеркал:

$$d_2 = -(d_1 + d_3) + \Delta; d_3 = -(1 + \Delta'),$$

где Δ' – величина, определяющая вынос фокальной плоскости ($\Delta' > 0$ – находится между 3-м и 4-м зеркалами, $\Delta' < 0$ – за 4-м зеркалом);

3) учет коэффициента центрального экранирования, который определяется лучом, проходящим на 3-е зеркало по краю двойного зеркала на высоте h_1 :

$$\varepsilon = h_1 / h_3 - \alpha_3 d_3.$$

На III этапе, учитывая условия масштаба и формулы табл. 1, составлена система параметрических уравнений монохроматических аберраций 3-го порядка, подлежащих компенсации, для выбора коррекционных параметров. Хроматические аберрации в зеркальной системе равны нулю.

Классификационный анализ. При классификационном анализе представляет практический интерес нахождение области конструктивных параметров, обеспечивающих плоское поле изображения. В области аберраций 3-го порядка кривизна изображения описывается аберрационным полиномом D_0 , которым можно управлять, изменяя параметры r и d .

При исправленном астигматизме имеем формулу

$$D_0 = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^4 \frac{\chi_s \alpha_{s+1} - \chi_{s+1} \alpha_s}{h_s}.$$

Решение с заданным коэффициентом центрального экранирования в параметрическом модуле *анастигмата с плоским полем* определяет условие Петцваля:

$$2D_0 = A_1 - (\alpha_4 + 1) = 0,$$

где $A_1 = \alpha_2 - \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{h_2} + \frac{\alpha_4 + \alpha_3}{h_3}$; $\alpha_3 = \frac{\varepsilon h_2 - 1}{(d_2 - 1)\varepsilon}$; $h_3 = -\frac{\varepsilon h_2 - d_2}{(d_2 - 1)\varepsilon}$.

Схемные решения не имеют практической реализации при значениях параметров $h_3 = 0$ и $\alpha_2 = \frac{h_2 - 1}{\varepsilon h_2 - (1 + \Delta)}$. Конструктивный параметр h_2 находится из неравенства $h_2^2 - (3 + \Delta')h_2 + 1 < 0$. Технологически адаптируемые системы определяет следующее условие:

$$0,5(Q - \sqrt{Q^2 - 4}) < h_2 < 0,5(\sqrt{Q^2 - 4} + Q),$$

где $Q = 3 + \Delta'$ при толщине моноблока (в относительных единицах) $\Delta = 0,05$. Для рассматриваемой зеркальной композиции существуют расчетные варианты с плоским полем, когда $0 \leq \alpha_2 \leq 1$ и $\varepsilon \geq 0,5$, а углы α_2 и α_4 :

$$\alpha_2 = -\frac{h_2^2 - (3 + \Delta')h_2 + 1}{(h_2 - 1)(1 + \Delta')}; \quad \alpha_4 = -\frac{h_2 - 1}{1 + \Delta'}$$

Аберрационные параметрические уравнения. Запишем уравнения связи аберрационных полиномов с конструктивными параметрами для четырех зеркал в переменных Ланге:

$$2B_0 = \sum_{s=1}^{s=4} h_s Q_s;$$

$$2K_0 = \sum_{s=1}^{s=4} h_s S_s Q_s - \frac{1}{2}(1 - \alpha_1^2);$$

$$2C_0 = \sum_{s=1}^{s=4} h_s S_s^2 Q_s - \sum_{s=1}^{s=4} S_s \Delta(\alpha_s)^2 - \frac{\chi_5}{2R_p};$$

$$D_0 - C_0 = \frac{\chi_5}{2R_p}.$$

Параметр χ_5 описывает среду пространства изображения: $\frac{\chi_5}{R_p} = \sum_{s=1}^{s=4} (-1)^{s+1} \frac{\sum \alpha_s}{h_s}$.

Окончательную подстановку в связи с громоздкостью полученных формул осуществляем в среде MathCAD, используя вспомогательные аберрационные величины T, S, W, Q , определяемые формулами: $P_s = \frac{(-1)^{s+2}}{4} (\Delta \alpha_s)^2 \sum \alpha_s$, $T_s = \frac{(-1)^{s+2}}{4} (\sum \alpha_s)^3$, $W_s = \frac{1}{2} \Delta \alpha_s \sum \alpha_s$, $S_s = \sum_{k=1}^{k=s-1} \frac{\chi_{k+1} d_k}{h_k h_{k+1}}$, $Q_s = T_s \sigma_s + P_s$.

Вариант решения. Из технологических соображений одну из поверхностей монолита целесообразно принимать сферической. К примеру, для $\sigma_4 = 0$ имеем систему уравнений:

$$\sum_{s=1}^{s=3} h_s Q_s + h_4 P_4 = 0; \quad -0,5 + \sum_{s=2}^{s=3} h_s Q_s S_s + h_4 S_4 P_4 = 0; \quad A - \sum_{s=2}^{s=3} h_s S_s^2 Q_s - h_4 S_4^2 P_4 = 0,$$

решение которой представим в виде сводки формул:

$$Q_1 = \frac{A - 0,5(S_3 + S_2) - h_4 P_4 (S_4 - S_2)(S_4 - S_3)}{S_3 S_4};$$

$$Q_2 = \frac{A - 0,5 S_3 - h_4 S_4 (S_4 - S_3) P_4}{h_2 S_2 (S_3 - S_2)};$$

$$Q_3 = \frac{A - 0,5 S_2 - h_4 S_4 (S_4 - S_2) P_4}{h_3 S_3 (S_3 - S_2)}.$$

Деформации зеркал, входящие в абберационные полиномы как коррекционные параметры, связаны со значением квадрата эксцентриситета поверхностей равенством $\sigma = -e^2$.

Анализ результатов расчета. Используя данную методику, рассчитан ряд базовых вариантов с исправленными основными абберациями 3-го порядка. При выносе плоскости приемника изображения ($\Delta' < 0$) область возможных значений параметра h_2 сужается, но поперечные и продольные габариты объектива меньше: $h_2 = 1,8$; $d_2 = 1,5f'$. Получен базовый модуль с оптическими параметрами ($f' = 200$ мм; $D/f' = 1 : 1$; $2\omega = 12^\circ$, $S' = 180$ мм). В результате оптимизации базового модуля для $\Delta' = -0,3$ получена зеркальная композиция с двумя сферическими зеркалами (3-м и 4-м), которая может быть промышленно адаптирована (минимальные допуски на развороты зеркал от $\pm 1'$ до $\pm 2,5'$, допуск на децентрировку от $\pm 0,1$ мм до $\pm 0,5$ мм).

Форма асферических поверхностей первых двух зеркал определяется уравнениями:

$$y^2 + z^2 = 200x - 2,96061x^2 - 0,0148328x^3; \quad y^2 + z^2 = 333,34x - 0,484758x^2.$$

Система масштабирована с коэффициентом $N = 4$ ($f' = 50$ мм) для использования в дальней ИК области. Оптическая схема композиции приведена на рис. 2, значения продольных и поперечных аббераций представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения геометрических аббераций

Table 2. Values of geometrical aberrations

Относительные координаты зрачка	Абберации осевого пучка					
	Продольные абберации, мм			Поперечные абберации, мм		
	$\lambda = 8$ мкм	$\lambda = 10$ мкм	$\lambda = 12$ мкм	$\lambda = 8$ мкм	$\lambda = 10$ мкм	$\lambda = 12$ мкм
1	0,00997	0,00997	0,00997	0,00997	0,00997	0,00997
0,866	0,01002	0,01002	0,01002	0,004808	0,004808	0,004808
0,707	0,00893	0,00893	0,00893	0,003371	0,003371	0,003371
0,5	0,00562	0,00562	0,00562	0,001449	0,001449	0,001449

Система обладает стабильной коррекцией аббераций по полю: в плоскости установки кружок рассеяния равен 0,01 мм в центре и не превышает 0,05 мм с небольшим фоном выше этого предела на краю. Кривизна изображения исправлена, величина астигматизма не превышает 0,05 мм. Для края поля зрения частота 60 мм^{-1} передается с контрастом не менее 0,5.

Защита изображения и виньетирование. Исследована возможная засветка плоскости изображения посторонним светом, отраженным: а) только от зеркал 1 и 2; б) только от зеркал 3 и 4; в) после системы из зеркал 1, 2, 3 и обратно на зеркало 2; г) от следующей последовательности зеркал: 3–4–3–2. Конструкция позволяет защитить плоскость изображения от постороннего света, описанного в пунктах а–в, для устранения остального постороннего света необходимо введение специальной бленды.

Особенность методики расчета по ходу «паразитного» луча, отраженного только от зеркал 3 и 4: плоскость изображения переносится в бесконечность, поэтому проверяются возможные лучи посторонней засветки, идущие углом поля зрения (после системы из зеркал 1 и 2). Наиболее эффективным приемом по срезанию посторонних лучей является увеличение диаметра двойного

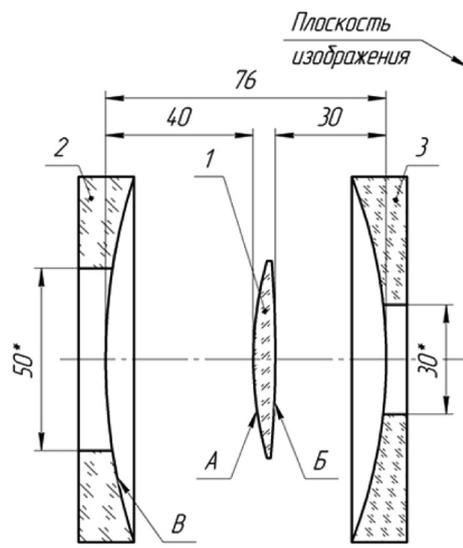


Рис. 2. Оптическая схема новой зеркальной композиции плананастигмата

Fig. 2. Optical scheme of new mirror plananastigmat composition

зеркала, что позволяет ввести бленду L (см. рис. 1). Виньетирование для углового поля зрения $2\omega = 12^\circ$ составляет 30 % при экранировании по площади входного зрачка порядка 30 %, что вполне допустимо для светосильных систем.

Заключение. Предложена методика расчета новой четырехзеркальной композиции с параллельным ходом лучей между 2-м и 3-м зеркалами, конструктивной особенностью которой является наличие двойного зеркала. Установлены и структурно определены инженерные составляющие, включающие средства параметрического синтеза и классификационного анализа базовых схем: введение коэффициента сложности, зависящего от экранирования ε , выноса изображения Δ' , от оптимального соотношения конструктивных параметров. Разработана модель абберационного параметрического алгоритма для расчета новой зеркальной композиции. Исправление сферической абберации, комы и астигматизма достигается изменением формы профиля зеркальных поверхностей, определяемыми деформациями σ_s . Проведен классификационный анализ схем с целью получения плоского поля изображения.

Разработана новая композиция, обладающая увеличенным углом поля зрения и высокой светосилой в условиях обеспечения удобного размещения плоскости изображения; получен патент Республики Беларусь. Система технологически адаптирована, имеет две сферические поверхности. Отсутствие хроматических аббераций, наличие высокой разрешающей способности и приемлемые условия для размещения приемной аппаратуры в новой композиции зеркального планнастигмата открывают широкие возможности по ее применению. Результаты расчетов и полученные формулы могут быть использованы при проектировании новых зеркальных систем теплового сканирования.

Список использованных источников

1. Современные оптико-электронные комплексы как результат внедрения достижений в области оптики / М. М. Мирошников [и др.] // Оптика XXI век : материалы 6-го Междунар. оптического конгресса, Санкт-Петербург, 18–21 окт. 2010 : в 3 ч. / редкол.: В. М. Арпишкин [и др.]. – СПб., 2010. – Ч. 1. – С. 2–6.
2. Лебедева, Г. И. Перспективные аэрокосмические зеркальные объективы / Г. И. Лебедева, А. А. Гарбуль // Оптич. журн. – 1994. – № 8. – С. 57–62.
3. Smith, W. J. *Modern Optical Engineering, the Design of Optical Systems* / W. J. Smith. – New York: McGraw-Hill, 2000. – 617 p.
4. Оптико-электронные системы для дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс] / А. М. Аронов [и др.]. – Режим доступа: http://www.lomo-tech.ru/photos/lomo_kosm_otkr.pdf. – Дата доступа: 01.08.2015.
5. Артюхина, Н. К. Теория, методы проектирования и расчет оптики зеркальных систем / Н. К. Артюхина ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2009. – 309 с.
6. Васильев, В. Н. Основы проектирования экспертных систем компоновки объективов / В. Н. Васильев, И. Л. Лившиц, Д. И. Муромцев. – СПб.: Наука, 2012. – 208 с.

References

1. Miroshnikov M.M., Iozep E.A., Mirzoeva L.A., Mack A.A., Makovtsov G.A., Arkhipova L.N., Zakharenkov V.F., Pavlov V.S. Modern optical-electronic complexes as result of introduction of achievements in the sphere of optics. *Optika XXI vek : materialy 6-go Mezhduнародного opticheskogo kongressa, Sankt-Peterburg, 18–21 oktyabrya 2010. Chast' 1* [Optics 21st century: materials of the 6th International optical congress, St. Petersburg, 18–21 October 2010. Part 1]. Sankt Petersburg, 2010, pp. 2–6. (In Russian).
2. Lebedeva G.I., Garbul A.A. Perspective air-space mirrors designs. *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 1994, no. 8, pp. 57–62. (In Russian).
3. Smith W.J. *Modern Optical Engineering, the Design of Optical Systems*. New York, McGraw-Hill, 2000. 617 p.
4. Aronov A.M., Danilov V.A., Nikiforov V.O., Savitsky A.M., Sokolsky M.N. *Optical-electronic systems for remote probing the cosmos Earth*. Available at: http://www.lomo-tech.ru/photos/lomo_kosm_otkr.pdf (date access 01 August 2015). (In Russian).
5. Artyukhina N.K. *Theory, methods of design and calculation of mirror systems*. Minsk, 2009. 309 p. (In Russian).
6. Vasil'ev V.N., Livshits I.L., Muromtsev D.I. *Bases of design of expert systems of lens configuration*. Sankt Peterburg, Nauka Publ., 2012. 208 p. (In Russian).

Информация об авторе

Артюхина Нина Константиновна – доктор технических наук, профессор кафедры «Лазерная техника и технология», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: art49@mail.ru

Для цитирования

Артюхина, Н. К. Методика параметрического расчета новой композиции зеркального плананастигмата / Н. К. Артюхина // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 115–121.

Information about author

Artioukhina Nina Konstantinovna – D. Sc. (Engineering), Professor of Department of the Laser Equipment and Technology, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: art49@mail.ru

For citation

Artioukhina N.K. Parametrical calculation technique of the new mirror plananastigmat composition. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 115–121. (In Russian).

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ
INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

УДК 621.372.037.372

Поступила в редакцию 30.08.2016

Received 30.08.2016

В. К. Железняк, И. Б. Бураченко, Д. С. Рябенко

Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОТ УТЕЧКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ

Обоснован метод оценки нормативного показателя защищенности речевого сигнала по критерию разборчивости речи в полосах равной разборчивости речи в шумах высокого уровня сложным измерительным сигналом с большой базой. Показано преимущество сложного измерительного сигнала с большой базой перед гармоническим измерительным сигналом при оценке защищенности каналов утечки речевой информации.

Наряду с аналоговой формой речевого сигнала широко используются речевые сигналы в цифровой форме. Для речевых сигналов в цифровой форме необходимо установить математическую зависимость между вероятностью ошибочного приема бита и величиной разборчивости речи. Для сложных сигналов с большой базой по аналогии с речевыми сигналами в цифровой форме необходимо установить математическую зависимость с гармоническим измерительным сигналом. Целью работы является определение нормативного показателя защищенности речевых сигналов в каналах утечки информации на основании установленных математических зависимостей. Данные математические зависимости позволят реализовать автоматизированную измерительную систему для комплексной оценки защищенности конфиденциальной информации, обрабатываемой в аналоговой и цифровой форме, в технических каналах ее утечки.

Ключевые слова: речевой сигнал, разборчивость речи, измерительный сигнал, технический канал утечки информации, нормированный показатель, аналоговая и цифровая форма сигнала.

V.K. Zheleznyak, I.B. Burachenok, D.S. Rabenka

Polotsk State University, Novopolotsk, Belarus

ASSESSMENT CRITERIA OF VOICE SIGNAL LEAKAGE PROTECTION

A method of assessing of normative protection indicator of speech signal by the criterion of speech intelligibility at high noise level in the band of speech signal, equal to intelligibility, by means of complex measuring signal with a large base, is substantiated. The advantage of the complex measuring signal with a large base over harmonic measuring signal when assessing protection of speech data leakage channels is shown.

Voice signals in digital form along with voice signals in analog form are widely used. It is necessary to find mathematical relation between bit-error probability and speech intelligibility for voice signals in digital form. It is also necessary to establish mathematical relation between compound signal with large base and harmonic measuring signal. The main purpose of the study is to establish a normative characteristic of leakage protection of voice signals on the base of determined mathematical relations. The given mathematical relations will allow realizing the automated measuring system for estimation of security of the confidential information transformed into the analog and digital form, in channels of its leak.

Keywords: voice signal, speech intelligibility, measuring signal, technical information leakage channel, normalized index, analog and digital waveform.

Введение. Стандарт СТБ 34.101.29-2011 устанавливает требования к измерительным сигналам для оценки защищенности речевых сигналов (РС) по техническим каналам утечки (ТКУ). С целью установления степени защищенности в ТКУ РС широко применяется гармонический измерительный сигнал (ГИС), обоснованный корреляционной теорией разборчивости речи и обладающий рядом преимуществ по сравнению с другими сигналами [1].

Основная часть. С целью обоснования сложного измерительного сигнала с большой базой (СИС ББ) [2] установим математическую зависимость между нормированным показателем защищенности ГИС и показателем, устанавливающим защищенность СИС ББ. Для оценки используем k СИС ББ в k -полосах равной разборчивости. Исходными данными измерительных сигналов являются постоянные значения длительности T_c и девиации частоты $\pm \Delta f_k$, перекрывающей каждую из k -полос равной разборчивости [3] ($k=1, n$, где k – порядковый номер полосы равной разборчивости, n – количество полос равной разборчивости).

Энергетический спектр W СИС ББ представляют выражением [4]:

$$W = \frac{\pi U_0^2}{2\mu} = \frac{\pi U_0^2 T_c}{2\pi \Delta f} = \frac{U_0^2 T_c^2}{2\Delta f T_c} = \frac{U_0^2 T_c^2}{B}, \quad (1)$$

где U_0 – амплитуда сигнала, $\mu = \Delta\omega/T_c$ – скорость нарастания частоты СИС ББ, а B – база сигнала $B = 2\Delta f T_c$.

Так как из [5] для любого детерминированного сигнала отношение сигнал/шум (ОСШ) в диапазоне $0 \leq t \leq T_c$ определяют как $q^2 = \frac{2E}{N_0}$, где N_0 – спектральная плотность мощности шума [5], а E – энергия сигнала, то ОСШ для СИС ББ можно представить:

$$q_{\text{вых_сл}}^2 = \frac{2U_0^2 T_c^2}{BN_0} 2\Delta f = \frac{2U_0^2 T_c^2 2\Delta f}{T_c 2\Delta f N_0} = \frac{2U_0^2 B}{2\Delta f N_0} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} 2B, \quad (2)$$

где $P_{\text{ш}} = N_0 2\Delta f$ – мощность шума в заданной полосе равной разборчивости $2\Delta f$, а $P_c = U_0^2$ – мощность сигнала.

Таким образом, ОСШ на выходе приемника $q_{\text{вых_сл}}^2$ связано с ОСШ на входе приемника $\rho_{\text{вх_сл}}^2 = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}}$:

$$q_{\text{вых_сл}}^2 = 2B\rho_{\text{вх_сл}}^2. \quad (3)$$

ОСШ на выходе $q_{\text{вых_сл}}^2$ определяет рабочие характеристики приема СИС ББ, а ОСШ на входе $\rho_{\text{вх_сл}}^2$ – энергетику сигнала и шума. Величина $q_{\text{вых_сл}}^2$ может быть получена, даже если $\rho_{\text{вх_сл}}^2 \ll 1$. Для этого достаточно выбрать СИС ББ B , удовлетворяющей (3) [2]. Как видно из (2), прием СИС ББ сопровождается усилением сигнала (или подавлением помехи) на выходе. Таким образом, чем больше база сложного сигнала, тем меньше ОСШ на входе приемника можно допустить при заданной надежности обнаружения.

Для нашего случая, когда каждая полоса имеет постоянное значение девиации частоты $\pm \Delta f_k$, при увеличении длительности T_c исходного сигнала можно увеличивать значение размера базы и тем самым улучшать ОСШ на выходе приемника. Исходя из того, что в широкополосных системах связи прием информации характеризуется отношением ОСШ $h_0^2 = \frac{q^2}{2}$ [2], то есть $h_0^2 = B\rho_{\text{вх_сл}}^2$, то зависимость полученного ОСШ СИС ББ на выходе приемника от ОСШ на входе приемника можно представить, как показано на рис. 1.

Однако увеличение длительности СИС ББ приводит к увеличению времени оценки защищенности ТКУ РС, что в нашем случае является критичным.

Так как ГИС относится к классу простых сигналов, у которых величина базы всегда равна единице $B=1$ [2], то для такого сигнала на выходе ОСШ можно представить

$$q_{\text{гар}}^2 = \frac{2E}{N_0} = \frac{P_c T_c}{N_0} \frac{2\Delta f}{2\Delta f} = \frac{P_c}{N_0} \frac{B}{2\Delta f} = \frac{P_c}{N_0}$$

или

$$q_{\text{вых_гар}}^2 = \frac{2E}{N_0} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}}, \quad (4)$$

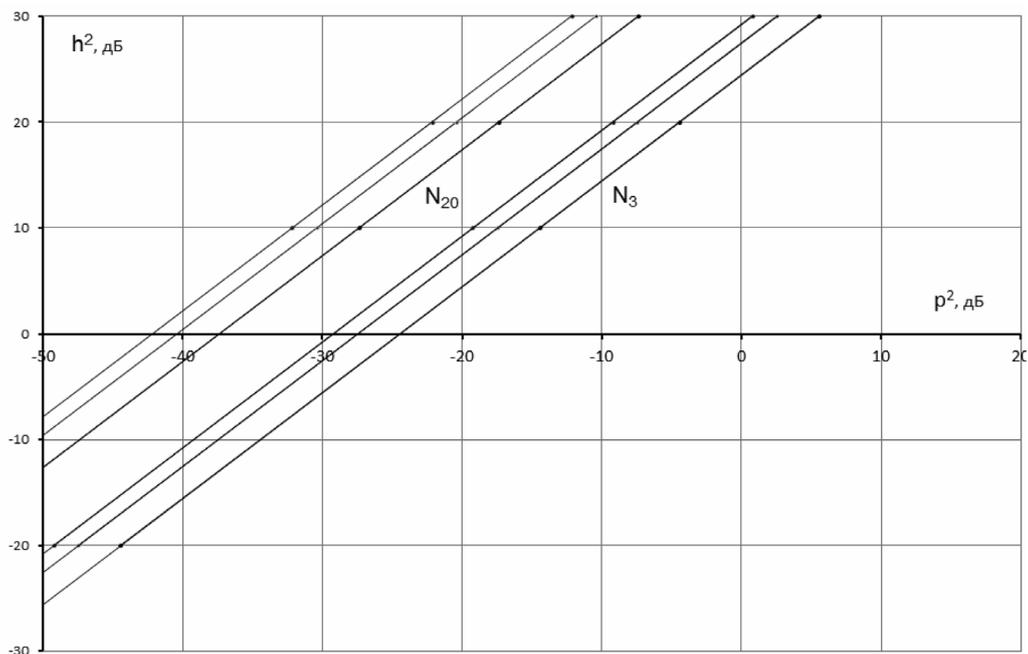


Рис. 1. Зависимость ОСШ СИС ББ на выходе приемника от ОСШ на входе приемника при $T_c = 2, 4, 6$ с в N_3 и N_{20} полосах равной разборчивости

Fig. 1. Dependence of the signal-to-noise ratio of complex measuring signal with a large base at the exit of the receiver from the signal-to-noise ratio on a receiver input at $T_c = 2, 4, 6$ second in N_3 and N_{20} in the band of equal to intelligibility

Нормативный показатель, устанавливающий математическую зависимость между нормированным показателем защищенности ГИС и показателем защищенности СИС ББ, определяют как ОСШ на выходе, оцененное при помощи СИС ББ $q_{\text{вых_сл}}^2$ к нормативному показателю $q_{\text{вых_гар}}^2$ защищенности РС в виде численного значения ОСШ ГИС:

$$\delta_{\text{сл}} = \frac{q_{\text{вых_сл}}^2}{q_{\text{вых_гар}}^2}. \quad (5)$$

Если нормативный показатель защищенности РС ГИС определяется как $q_{\text{вых_гар}}^2 = \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{норм}}$, то при равенстве ОСШ выходных ГИС и СИС ББ $(P_c / P_{\text{ш}})_{\text{сл}} = (P_c / P_{\text{ш}})_{\text{норм}}$ имеем:

$$\delta = \frac{q_{\text{вых_сл}}^2}{(P_c / P_{\text{ш}})_{\text{норм}}} = \frac{B(P_c / P_{\text{ш}})_{\text{сл}}}{(P_c / P_{\text{ш}})_{\text{норм}}} = B. \quad (6)$$

С помощью математической модели (6), фиксирующей однозначную связь метода оценки разборчивости речи СИС ББ с методом ГИС оценки разборчивости речи, установлено преимущество первого метода перед вторым, определяемое величиной базы первого сигнала, которое равно произведению времени существования сигнала на удвоенную девиацию частоты в пределах полосы равной разборчивости. Из (6) следует, что увеличение (выигрыш) ОСШ на выходе ТКУ при использовании СИС ББ по сравнению с ОСШ на его выходе при использовании ГИС зависит от размера базы сложного сигнала. На рис. 2 приведен график нормированных значений коэффициента разборчивости речи K_p на выходе ТКУ для ГИС и СИС ББ.

Из графика следует, что чем больше база СИС ББ, тем выше возможность обнаружения этого сигнала на фоне помех относительно ГИС. Таким образом, преимуществом СИС ББ является то, что с помощью такого сигнала можно получить большие значения ОСШ на выходе ТКУ РС.

При несомненном преимуществе качества РС в цифровой форме его защита от утечки по ТКУ сдерживается отсутствием единого критерия защищенности аналоговой и цифровой рече-

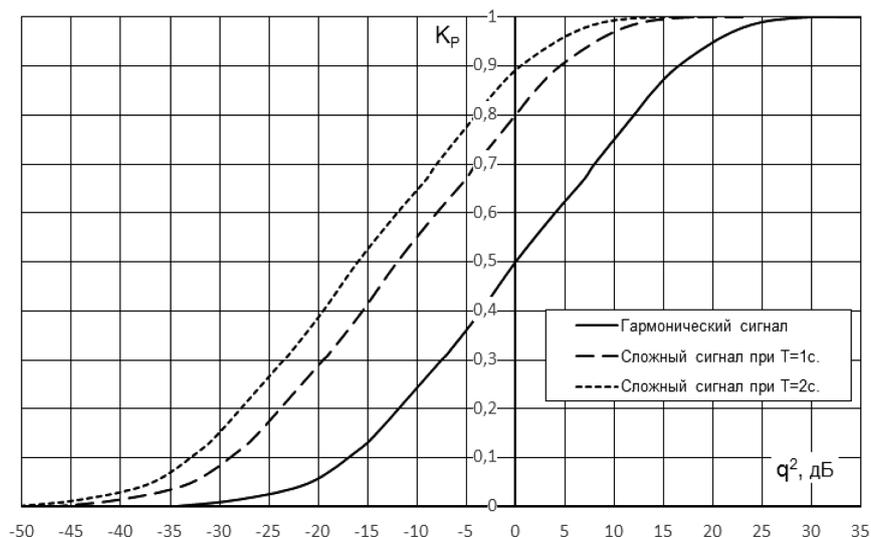


Рис. 2. Зависимость коэффициента разборчивости речи K_p от ОСШ на выходе ТКУ для ГИС и СИС ББ

Fig. 2. Dependence of coefficient of speech legibility on the signal-to-noise ratio at the exit of the technical channel of leak for a harmonic measuring signal and a complex measuring signal with a large base

вой информации и требует дальнейшего развития. Это в первую очередь относится к установлению нормативного показателя защищенности от утечки РС в цифровой форме. Преобразования РС из аналоговой формы в цифровую и наоборот обуславливают необходимость предложить и научно обосновать единый критерий оценки защищенности. В качестве критерия оценки качества РС в цифровой форме используют вероятность ошибочного приема бита. Необходимо исследовать и установить взаимосвязь между величиной разборчивости речи и вероятностью ошибочного приема бита. Важно определить численное значение показателя защищенности РС в цифровой форме в зависимости от численного значения нормированного показателя защиты аналогового РС.

По формуле Шеннона для нормированного численного значения ОСШ по мощности устанавливают пропускную способность аналогового РС [6]:

$$C_a = F \log(1 + P_c / P_{ш}), \text{ бит/с.} \quad (7)$$

Данное отношение определено в зависимости от нормированной величины разборчивости речи [1, 7]. Важным параметром, устанавливающим свойства каналов и сигналов, является пропускная способность C . Именно этот параметр предложен в качестве связующего звена между параметрами аналоговых РС и РС в цифровой форме.

При малом ОСШ для аналогового РС из формулы Шеннона значение пропускной способности представляется, согласно [7], как

$$C_a = F \log_2 e \cdot \frac{P_c}{N} = 1,443 \cdot F \cdot \frac{P_c}{N} = 1,443 \frac{P_c}{N_0} = 1,443 \Delta, \quad (8)$$

где C_a – пропускная способность канала для аналогового сигнала, бит/с; F – ширина полосы частот, Гц; P_c/N – отношение мощности сигнала к мощности шума; $P_c/N_0 = \Delta$ – нормативное значение отношения мощности речевого сигнала P_c к спектральной плотности мощности шума N_0 .

Пропускная способность канала утечки информации должна быть минимальной и определяться пределом Шеннона. Зададим пропускную способность C такой, чтобы она соответствовала невозможности извлечения информации из ТКУ. Пропускная способность для симметричного дискретного канала C в битах на один отсчет вычисляется, согласно [7], следующим образом:

$$C = F \left[\log_2 m + p_{ош} \log_2 \frac{p_{ош}}{m-1} + (1 - p_{ош}) \log_2 (1 - p_{ош}) \right], \quad (9)$$

где $p_{ош}$ – вероятность ошибочного приема многомерного сигнала.

Из формулы (9) при $m = 2$ получаем пропускную способность для цифрового сигнала $C_{ц}$ [7] для двоичного симметричного канала (ДСК) при условии, что пропускная способность C соответствует максимальной скорости передачи информации:

$$C_{ц} = 1 + p_{ош} \log_2 p_{ош} + (1 - p_{ош}) \log_2 (1 - p_{ош}). \quad (10)$$

По значению пропускной способности $C_{ц}$ и равенству $C_{ц} = C_a$ из формулы (10) вычисляют вероятность ошибочного приема бита $p_{ош}$. Нормативным значением оценки защищенности РС в цифровой форме следует принять величину вероятности ошибочного приема бита $p_{ош}$, соответствующую нормированному значению величины разборчивости речи.

Установив пропускную способность для аналогового РС (8), находим вероятность ошибочного приема бита по формуле (10), предварительно построив табличную и графическую зависимость между пропускной способностью и вероятностью ошибки [8]:

$$p_{ош} = \Phi\left(\sqrt{2 \cdot E_b/N_0}\right), \quad (11)$$

где E_b – энергия бита сигнала; $\Phi(x)$ – гауссов интеграл ошибок.

Из (8) при подстановке нормативного значения Δ получим предельную пропускную способность для цифрового сигнала. Полученное значение $C_{ц}$ позволяет по зависимости $C_{ц} = f(p_{ош})$ установить нормативную вероятность ошибочного приема бита $p_{ош}$ для ДСК.

По известной величине вероятности ошибочного приема бита устанавливают нормативное отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 либо отношения произведения мощности сигнала на длительность одного импульса к спектральной плотности мощности шума $P_c \tau/N_0$ в зависимости от используемого сигнала (противофазный фазоманипулированный сигнал, ортогональный частотно-манипулированный сигнал, сигнал с пассивной паузой амплитудно-манипулированный).

Критерием оценки защищенности аналогового РС является нормированное значение величины разборчивости речи [1]. Критерий защищенности РС в аналоговой форме должен адекватно соответствовать критерию РС в цифровой форме. В качестве критерия оценки защищенности от утечки РС в цифровой форме на основании формул Шеннона о пропускной способности канала предложено и научно обосновано числовое значение вероятности ошибочного приема бита информации.

Построена графическая зависимость коэффициента разборчивости K_p аналогового РС от вероятности ошибочного приема бита $p_{ош}$ (рис. 3). Корреляционная теория разборчивости

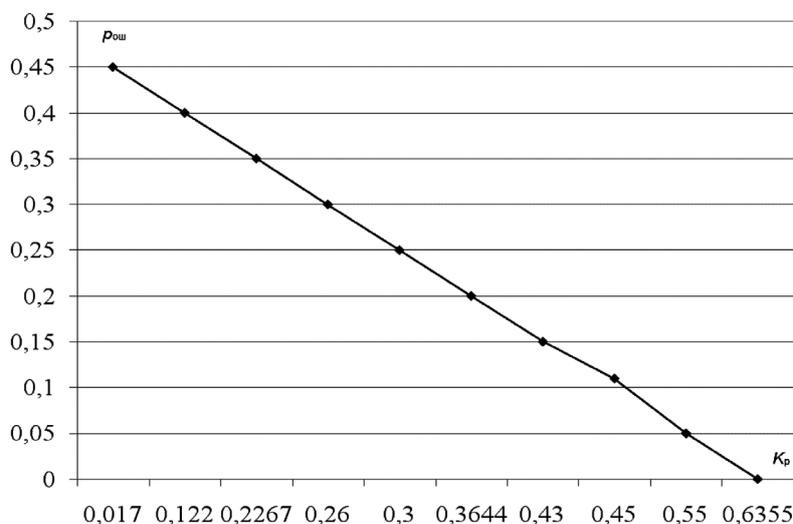


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибочного приема бита $p_{ош}$ от коэффициента разборчивости речи K_p

Fig. 3. Dependence of bit-error probability $p_{ош}$ on coefficient of speech legibility K_p

речи по ОСШ по мощности позволяет получить расчетное численное значение величины разборчивости речи в автоматизированном режиме с применением измерительных автоматизированных систем.

Заключение. Математическая зависимость критерия оценки защищенности РС СИС ББ и критерия оценки защищенности РС ГИС позволила установить нормативное значение показателя защищенности ТКУ РС, измеренного с помощью СИС ББ.

Корреляционная теория разборчивости речи [9] по ОСШ по мощности позволяет получить расчетное численное значение величины разборчивости речи с помощью программно-аппаратного комплекса.

Таким образом, установив нормированное значение критерия защищенности РС в цифровой форме и зависимости $p_{\text{ош}} = f(K_p)$ (рис. 3), решена задача оценки в автоматизированном режиме защищенности от утечки РС в цифровой форме.

Список использованных источников

1. Железняк, В. К. Защита информации от утечки по техническим каналам / В. К. Железняк. – СПб.: ГУАП, 2006. – 188 с.
2. Варакин, Л. Е. Теория сложных сигналов / Л. Е. Варакин. – М.: Совет. радио, 1970. – 376 с.
3. Железняк, В. К. Представление параметров широкополосного линейно-частотно-модулированного сигнала для оценки разборчивости речи в технических каналах утечки информации / В. К. Железняк, К. Я. Раханов, И. Б. Бураченко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундамент. науки. – 2014. – № 12. – С. 2–12.
4. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – М.: Высш. шк., 1988. – 446 с.
5. Линдсей, В. С. Системы синхронизации в связи и управлении / В. С. Линдсей. – М.: Мир, 1978. – 600 с.
6. Солодов, А. В. Теория информации и ее применение к задачам автоматического управления и контроля / А. В. Солодов. – М.: Наука, 1967. – 432 с.
7. Ван Трис, Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции : в 4 т. / Г. Ван Трис. – М.: Совет. радио, 1975. – Т. 2. – 344 с.
8. Витерби, А. Д. Принципы цифровой связи и кодирования / А. Д. Витерби, Дж. К. Омура. – М.: Радио и связь, 1982. – 536 с.
9. Покровский, Н. Б. Расчет и измерение разборчивости речи / Н. Б. Покровский. – М.: Связьиздат, 1962. – 391 с.

References

1. Zheleznyak V.K. *Protection of the information against leakage through technical channels*. Sankt Petersburg, State University of Aerospace Instrumentation, 2006. 188 p. (In Russian).
2. Varakin L.E. *The theory of complex signals*. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1970. 376 p. (In Russian).
3. Zheleznyak V.K., Rakhanov K.Ya., Burachenok I.B. Presentation parameters of broadband linear frequency-modulated signal to evaluate intelligibility of technical information leakage channels. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta Seriya C. Fundamental'nye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences], 2014, no. 12, pp. 2–12. (In Russian).
4. Baskakov S.I. *Radio circuits and signals*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1988. 446 p. (In Russian).
5. Lindsey W.C. *Synchronization systems in communication and control*. N. J., Englewood Cliff, 1972.
6. Solodov A.V. *Information theory and its application to problems of automatic control and monitoring*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 432 p. (In Russian).
7. Van Tris G. *The theory of detection, evaluation and modulation. Vol. 2*. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1975. 344 p. (In Russian).
8. Viterbi A.D. *Principles of Digital Communication and Coding*. New York, McGraw-Hill, 1979. 588 p.
9. Pokrovskii N.B. *Calculation and measurement of speech intelligibility*. Moscow, Sviaz'izdat Publ., 1962. 391 p. (In Russian).

Информация об авторах

Железняк Владимир Кириллович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Республика Беларусь). E-mail: vlad@psu.by

Information about the authors

Zheleznyak Vladimir Kirillovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Radio Electronics, Polotsk State University (29, Blohin Str., 211440, Novopolotsk, Republic of Belarus). E-mail: vlad@psu.by.

Бураченко Ирина Брониславовна – старший преподаватель кафедры технологий программирования, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Республика Беларусь). E-mail: irina.psu@gmail.com

Рябенко Денис Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Республика Беларусь). E-mail: d.rabenka@psu.by

Для цитирования

Железняк, В. К. Критерии оценки защищенности от утечки речевых сигналов / В. К. Железняк, И. Б. Бураченко, Д. С. Рябенко // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 122–128.

Burachenok Irina Bronislavovna – Senior Lecturer, Department of Programming Technologies, Polotsk State University (29, Blohin Str., 211440, Novopolotsk, Republic of Belarus). E-mail: irina.psu@gmail.com

Rabenka Denis Sergeevich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor of the Department of Radio Electronics, Polotsk State University (29, Blohin Str., 211440, Novopolotsk, Republic of Belarus). E-mail: d.rabenka@psu.by.

For citation

Zheleznyak V.K., Burachenok I.B., Rabenka D.S. Assessment criteria of voice signal leakage protection. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 122–128. (In Russian).