

7. Попечиц В. И. Применение многокомпонентных растворов красителей для неразрушающего радиационного контроля материалов и изделий // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 9-й Междунар. конф. (Минск, 20–22 сент. 2011 г.). Минск, 2011. С. 444–445.

8. Попечиц В. И. Визуализаторы ионизирующего излучения на основе многокомпонентных растворов красителей // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. (Минск, 29–30 нояб. 2012 г.). Минск, 2012. Ч. 2. С. 128–133.

Поступила в редакцию 04.06.2015.

Владимир Иванович Попечиц – доктор физико-математических наук, доцент, ученый секретарь научно-исследовательского учреждения «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» БГУ.

УДК 539.171;621.384

В. Н. БОНДАРЕНКО, Л. С. ГЛАЗУНОВ, А. В. ГОНЧАРОВ, А. В. ЗАЦ,
С. Г. КАРПУСЬ, В. В. КУЗМЕНКО, В. М. ПИСТРЯК, В. И. СУХОСТАВЕЦ (УКРАИНА)

ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ ДВУХЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ${}^4\text{He}$ НА МАЛОГАБАРИТНОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ УСКОРИТЕЛЕ «СОКОЛ»

Для малогабаритного электростатического ускорителя горизонтального типа «Сокол» в Национальном научном центре «Харьковский физико-технический институт» разработаны два метода разделения пучка ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ . В первом случае используется раздаточный магнит и электростатический анализатор, во втором – перед магнитом устанавливается тонкая углеродная пленка, в которой происходит развал ионов H_2^+ .

Показано, что второй метод позволяет получить пучок ${}^4\text{He}^{2+}$ с более низким содержанием ионов H_2^+ . Остаточное содержание обусловлено наличием микроотверстий в тонкой пленке.

Использование пучка ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ с энергией 3 МэВ позволило изучить многослойную структуру, состоящую из чередующихся слоев Ta_2O_5 и SiO_2 , на глубину более 2,5 мкм. С помощью спектрометрии резерфордского обратного рассеяния определена толщина отдельных слоев.

Ключевые слова: электростатический ускоритель; источник многозарядных ионов; разделение ионных пучков; ионно-пучковый анализ.

Two methods of ${}^4\text{He}^{2+}$ and H_2^+ beams separation at the compact horizontal type accelerator «Sokol» of National Science Centre «Kharkov Institute of Physics and Technology» have been developed. The first method is realized using the mounted beam-bending magnet and the electrostatic analyzer. By the second method, H_2^+ dissociation on the interaction with thin carbon films is used. The application of this method offers lower content of H_2^+ ions in ${}^4\text{He}^{2+}$ beams. The residual content is due to the presence of pinholes in the thin carbon films.

The multilayer structure consisting of alternate Ta_2O_5 and SiO_2 layers on the SiO_2 substrate has been investigated by Rutherford backscattering spectrometry (${}^4\text{He}^{2+}$ beam energy was equal 3 MeV) to the depth more than 2,5 μm . The layers thicknesses were determined.

Key words: electrostatic accelerator; multi-charged ion source; ion beam separation; ion-beam analysis.

В настоящее время в мире работает более 200 аналитических установок, созданных на базе ускорителей заряженных частиц. В Национальном научном центре «Харьковский физико-технический институт» в 1984 г. был создан аналитический ядерно-физический комплекс «Сокол» на базе малогабаритного электростатического ускорителя (ЭСУ) горизонтального типа [1]. В дальнейшем комплекс был несколько раз модернизирован в целях расширения его аналитических возможностей [2].

Краткая характеристика устройств ускорителя «Сокол»

Сегодня на комплексе «Сокол» используются два инжектора ионов: один на базе высокочастотного источника ионов и новый инжектор с источником многозарядных ионов [3]. В первом случае ускоряются только однозарядные ионы газов, во втором – одно- и многозарядные.

Раздаточный магнит позволяет отклонять пучок ускоренных ионов заданной массы по пяти каналам и одновременно является масс-анализатором. Эксперименты, описанные в настоящей работе, проводились на одном из этих каналов (рис. 1).

Методы разделения ионов по массам

Для аналитических целей используются в основном протоны и одно- или двухзарядные ионы гелия. Поскольку в остаточном газе в установке присутствует водород и водородосодержащие газы, то в источнике наряду с ионами ${}^4\text{He}^{2+}$ образуются ионы H_2^+ . Сечение образования H_2^+ примерно в 10^3 раз больше сечения образования ${}^4\text{He}^{2+}$ [4; 5, с. 60–62]. В связи с этим токи ионов H_2^+ и ${}^4\text{He}^{2+}$ могут быть сравнимы по величине и возникает задача разделения этих пучков.

Существуют два метода разделения ионов по массам, которые могут быть использованы в нашем случае: магнитный масс-анализатор и развал ионов H_2^+ при прохождении через тонкие пленки углерода.

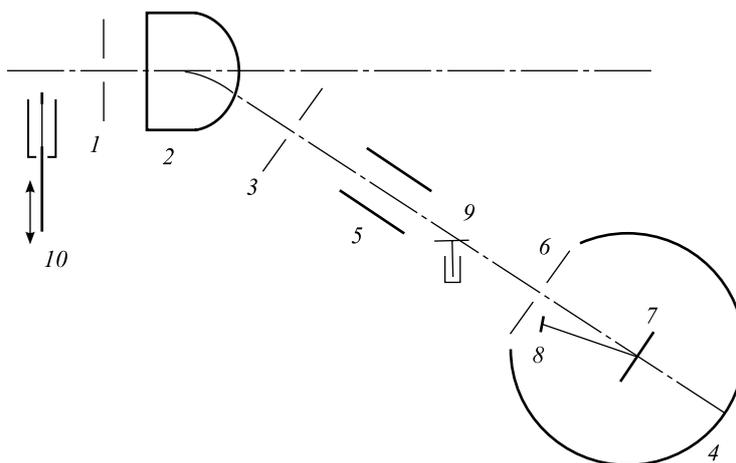


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению разделения пучков ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ :
 1 – диафрагма \varnothing 5 мм; 2 – магнитный масс-анализатор (ММА); 3 – щелевой прибор;
 4 – экспериментальная камера; 5 – электростатический анализатор (ЭСА); 6 – щель $0,9 \times 9$ мм;
 7 – цилиндр Фарадея (ЦФ), или Та-мишень; 8 – поверхностно-барьерный детектор;
 9 – монитор пучка; 10 – узел тонких углеродных мишеней

Поскольку условия размещения оборудования не позволяют дополнительно установить магнитный масс-анализатор, то была рассмотрена возможность разделения ионов H_2^+ и ${}^4\text{He}^{2+}$ с помощью существующего раздаточного магнита. На основе выражений, представленных в работе [6], был выполнен расчет расходимости траекторий двух ионов (H_2^+ и ${}^4\text{He}^{2+}$) на определенном расстоянии от выхода из раздаточного магнита. В частности, на расстоянии 2,54 м, которое соответствует положению диафрагмы 6 (см. рис. 1), расчетная расходимость данных траекторий составляет 4,25 мм.

Экспериментальное определение разделения ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+

Исследование разделения ионов гелия и водорода проводилось по схеме, представленной на рис. 1. Для определения парциальных токов ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ в общем токе пучка после прохождения щели использовалось измерение зависимости тока пучка в ЦФ от величины напряжения на ЭСА (рис. 2, а). Кроме того, отношение этих токов можно было определить из отношения измеренных выходов обратно-рассеянных частиц He и H от Та-мишени (рассеянные частицы регистрировались поверхностно-барьерным детектором (см. рис. 1, 8), угол регистрации составлял 170°).

Измерение токов проводилось с помощью интегратора [7].

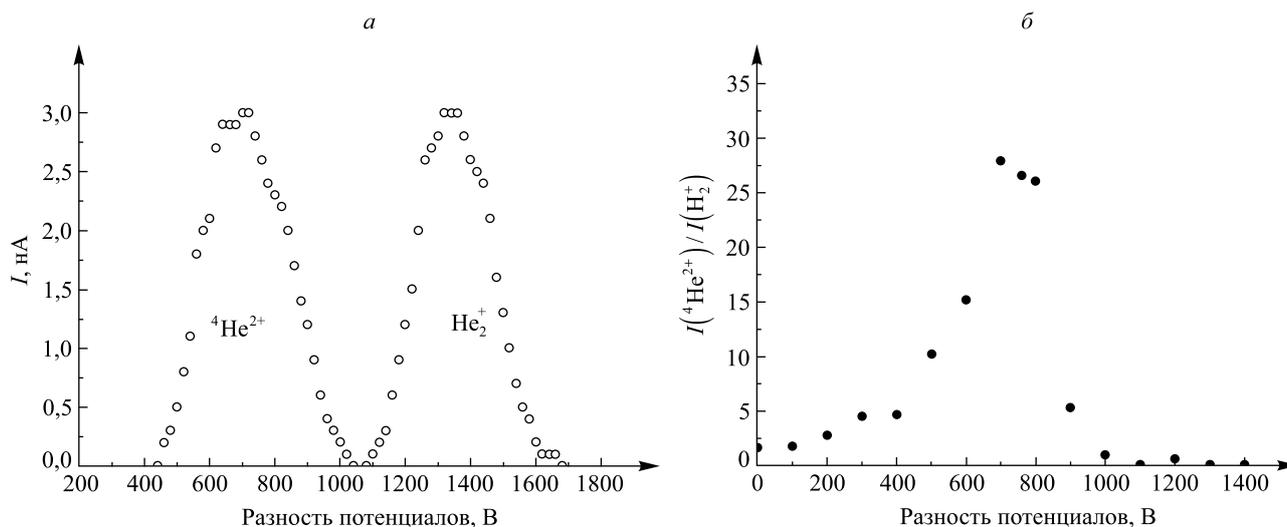


Рис. 2. Профили пучков ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ (а) и соотношение токов частиц ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ (б) по данным, полученным методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Оба распределения даны для случая, когда углеродная пленка перед ММА отсутствует. Напряжение на высоковольтном кондукторе ускорителя равно 1,5 МВ

Из рис. 2, а, видно, что после прохождения через ММА парциальные токи ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ в общем пучке примерно равны. В соответствии с данными расчета, представленного выше, разность напряжений $1400 - 700 = 700$ В на ЭСА между положениями двух максимумов измеренной зависимости составляет 4,25 мм. Отсюда можно найти ширину распределений ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ , каждая составляет около 4 мм. Измеренная зависимость демонстрирует хорошую степень разделения парциальных пучков.

Спектры POP измерялись в диапазоне разностей потенциалов на ЭСА, том же, что и на графике (см. рис. 2, а). В результате обработки спектров определялось соотношение потоков обратнорассеянных ионов гелия и водорода, из которого можно было определить и соотношение токов ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ в первичном пучке. В частности, при напряжении 700 В на ЭСА, что соответствует максимуму тока ионов ${}^4\text{He}^{2+}$, величина этого тока примерно в 27 раз больше тока ионов H_2^+ (рис. 2, б).

Таким образом, проведенные измерения показывают, что использование раздаточного магнита и электростатического анализатора позволяет разделить пучки ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ .

Разделение пучков ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ с помощью углеродных пленок

При прохождении ионов через тонкие пленки возможны процессы, связанные с захватом и потерей электронов (перезарядка, обдирка, нейтрализация), а также развал молекулярных ионов. В частности, процесс диссоциации ионов H_2^+ при прохождении через углеродную пленку рассматривался в работах [8, 9].

Таким образом, если перед раздаточным магнитом на пути пучка установить тонкую углеродную пленку, то можно ожидать развала ионов H_2^+ на H^+ и H^0 . Эти частицы не пройдут через масс-анализатор, и пучок ионов He очистится от ионов водорода. Но при этом может быть потеряна некоторая часть ионов ${}^4\text{He}^{2+}$.

В настоящей работе в экспериментах по разделению пучков ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ использовались свободные пленки, полученные с помощью метода вакуумно-дугового осаждения. Толщина пленок и их состав определялись с помощью метода POP.

Из литературных данных [10] известно, что при прохождении пучка ионов гелия через пленку устанавливается определенное распределение ионов по зарядовым состояниям. Согласно приведенным данным, при использовании углеродной пленки толщиной 79 нм (18 мкг/см^2) в экспериментах с пучками H_2^+ с энергией от 2 до 3,5 МэВ потеря тока пучка за счет перезарядки будет составлять менее 5%. Расчет прохождения пучка через такую пленку с помощью кода SRIM [11] показал, что сброс энергии составляет 14,5 кэВ и страгглинг равен 5,5 кэВ. Аналогичный расчет был выполнен для углеродной пленки толщиной 300 нм, которая тоже использовалась в эксперименте. Расчет показал, что сброс энергии на этой пленке составляет 75 кэВ, страгглинг равен 10 кэВ при начальной энергии иона ${}^4\text{He}^{2+}$ 3120 кэВ.

Таким образом, использование углеродной пленки толщиной порядка 80 нм перед ММА (см. рис. 1, 2) должно обеспечить незначительные потери пучка H_2^+ и полный развал молекулярного иона H_2^+ .

Для проведения экспериментов по разделению пучка ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ с помощью углеродных пленок был разработан и изготовлен их держатель, который устанавливается между ускорительной трубкой и раздаточным магнитом. Держатель позволяет разместить несколько пленок (в зависимости от их размеров) и обеспечивает их перемещение без нарушения вакуума в установке.

Из соотношения выходов обратного рассеяния частиц He и H на Ta (с учетом сечений рассеяния и тормозных способностей) рассчитывались отношения токов падающих на мишень частиц гелия и протонов. Получены следующие результаты: для пленки толщиной 300 нм отношение токов ${}^4\text{He}^{2+}$ к H_2^+ составило 88, а для фольги толщиной 79 нм – 52.

Данные результаты показывают, что использование углеродных пленок позволяет довольно хорошо очистить пучок ${}^4\text{He}^{2+}$ от ионов H_2^+ . Однако следует заметить, что применение углеродных пленок толщиной более 100 нм в диапазоне энергий ионов до 3,6 МэВ приводит к нежелательным эффектам, которые могут ухудшить аналитические возможности методов ядерно-физического анализа. К таким следует отнести потери доли тока пучка многозарядных ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ за счет захвата электрона при прохождении через углеродную пленку, увеличение потерь энергии, а также увеличение энергетического страгглинга.

Анализ многослойных покрытий $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2 \dots \text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ методом резерфордовского обратного рассеяния с использованием пучка ионов ${}^4\text{He}^{2+}$

Многослойные пленки из оксидов тантала и кремния находят широкое применение при создании лазерных интерферометров, оптических фильтров и других оптоэлектронных устройств [12]. Контроль стехиометрического состава и толщины отдельных слоев на разных этапах отработки технологии нанесения пленок может быть весьма полезным. Его можно проводить с помощью спектрометрии POP.

В настоящей работе методом POP ионов гелия проведено исследование пленки $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2 \dots \text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$, которая получена путем лазерного распыления оксидов Ta_2O_5 и SiO_2 в вакууме и поочередного их осаждения на подложку SiO_2 . Всего было нанесено 7 слоев Ta_2O_5 и 6 слоев SiO_2 . На рис. 3, а, приведен спектр POP ионов $^4\text{He}^{2+}$ с энергией 3,02 МэВ (режим работы ускорителя с новым инжектором на базе источника многозарядных ионов). Для сравнения на рис. 3, б, представлен спектр POP, измеренный на пучке ионов $^4\text{He}^+$ с энергией 1,5 МэВ (штатный режим работы ускорителя с инжектором на базе высокочастотного источника ионов).

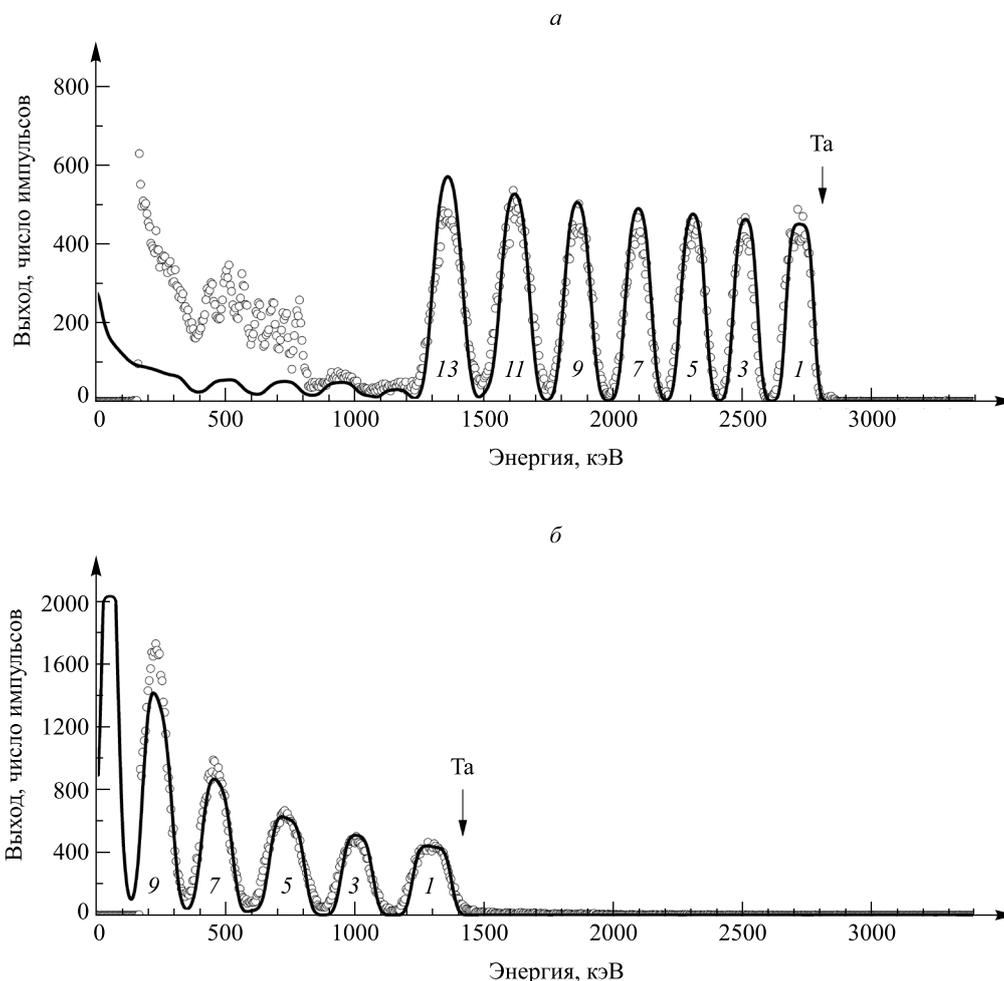


Рис. 3. Спектры обратного рассеяния ионов $^4\text{He}^{2+}$ с энергией 3 МэВ (а) и $^4\text{He}^+$ с энергией 1,5 МэВ (б) от многослойного покрытия $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2 \dots \text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$. Угол рассеяния – 170° . Кружочки – экспериментальный спектр; линия – подгонка

В спектрах POP (см. рис. 3, а) хорошо проявляются пики, обусловленные рассеянием ионов гелия в поле ядер атомов тантала, входящих в состав слоев Ta_2O_5 (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13). Наблюдающиеся в спектрах промежутки между пиками соответствуют слоям SiO_2 . Кроме того, в спектре на рис. 3, а, в области низких энергий (до 150-го канала) имеют место узкие пики, соответствующие рассеянию ионов водорода в поле ядер тантала. В анализируемом пучке присутствует небольшая примесь ионов молекулярного водорода, которая остается после прохождения системы разделения пучков с использованием ЭСА. Эта «водородная» часть спектра хорошо отделена от области пиков, соответствующих рассеянию ионов гелия на тантале, и поэтому практически не влияет на результаты обработки спектра. Обработка спектров велась в рамках модели однократного рассеяния [13]. При моделировании предполагалось, что каждый слой пленки состоит из оксида стехиометрического состава, а подгоночными параметрами являются толщины слоев. Предварительно с помощью стандартного образца из чистого Ta определялся выход обратнорассеянных ионов на стерадиан.

В результате подгонки получены значения толщин слоев Ta_2O_5 в диапазоне $(1,0 \dots 1,2) \cdot 10^{18}$ ат/см² и толщин слоев SiO_2 в диапазоне $(1,6 \dots 1,8) \cdot 10^{18}$ ат/см².

Таким образом, применение пучка двухзарядных ионов гелия позволило исследовать данную многослойную структуру по всей толщине.

Использование инжектора с источником многозарядных ионов на ускорителе «Сокол» увеличивает энергетический диапазон ионов, применяемых для облучения, расширяет аналитические возможности методов анализа на ионных пучках. Пучки двухзарядных ионов гелия позволяют проводить диагностику водорода в твердотельных мишенях с помощью метода ядер отдачи, исследовать профили концентрации водорода по глубине, применять резонанс $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}$ при энергии 3,038 МэВ в методе РОР для исследования тонких оксидных слоев, исследовать структуру и состав многослойных пленок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вергунов А. Д., Левченко Ю. З., Новиков М. Т., Пистряк В. М., Сторишко В. Е., Чеканов С. Я. Малогабаритный электростатический ускоритель на 2 МэВ горизонтального типа // ВАНТ. 1983. № 3(24). Сер. Общая и ядерная физика. С. 13–15.
2. Бондаренко В. Н., Глазунов Л. С., Гончаров А. В., Зац А. В., Кузьменко В. В., Левенец В. В., Омельник А. П., Пистряк В. М., Сухоставец В. И., Щур А. А. Аналитический ядерно-физический комплекс ННЦ ХФТИ «Сокол» (опыт эксплуатации и модернизация) // Тр. XVI Междунар. конф. по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям (Обнинск, 6–8 июня 2006 г.). Обнинск, 2006. С. 98–107.
3. Glazunov L. S., Zats A. V., Karpus S. G., Kuz'menko V. V., Pistryak V. M. Multi-charged ion source // Problems of atomic science and tech. Ser. Nuclear Phys. Investigations. 2011. № 3(55). P. 68–74.
4. Kim Y.-K., Irikura K. K. Electron-impact total ionization cross section of molecular ions // J. of Research of NIST. 2000. Vol. 105, № 2. P. 285–291.
5. Кузема А. С., Савин О. Р., Чертков И. Я. Анализирующие системы магнитных масс-спектрометров. Киев, 1987.
6. Мищенко В. М., Попов А. И., Сторишко В. Е. Универсальный интегратор тока. Харьков, 1971.
7. Gailard M. J., Poizat J. C., Remilleux J. Observation of dissociative H_2^+ ions emerging from very thin foils // Phys. Rev. Letters. 1978. Vol. 41, № 3. P. 159–162.
8. Cue N., De Castro Faria N. V., Gaillard M. J., Poizat J. C., Remilleux J. Electron loss and capture cross sections of 800 KeV amu^{-1} H and He species in carbon foils // NIM. 1980. Vol. 170, iss. 1–3. P. 67–72.
9. Armstrong J. C., Mullendore J. V., Harris W. R., Marion J. B. Equilibrium charge-state fractions of 0,2 to 6,5 MeV helium ions in carbon // Proc. Phys. Soc. 1965. Vol. 86. P. 1283.
10. Ziegler J. F., Ziegler M. D., Diersack J. P. SRIM – The stopping and range of ions in matter // NIM. Section B. 2010. Vol. 268, iss. 11/12. P. 1818–1823.
11. Parmentier R., Lemarchand F., Catheiliaud M., Lequime M., Amra C., Labat S., Bozzo S., Booget F., Charaf A., Thomas O., Dominici C. Piezoelectric tantalum pentoxide studied for optical tunable applications // Appl. Optics. 2002. Vol. 41, № 16. P. 3270–3276.
12. Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А., Таушыков И. С. Неразрушающий анализ поверхностей твердых тел ионными пучками. Минск, 1987.

Поступила в редакцию 02.03.2015.

Виктор Николаевич Бондаренко – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт».

Леонид Степанович Глазунов – ведущий инженер Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт».

Александр Васильевич Гончаров – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт».

Абрам Волькович Зац – научный сотрудник Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт».

Степан Геннадиевич Карпусь – младший научный сотрудник Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт».

Вячеслав Владимирович Кузьменко – начальник ускорительной установки Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт».

Виктор Михайлович Пистряк – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт».

Владимир Иванович Сухоставец – научный сотрудник Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт».

УДК 669.017:669.15-194.018.26

В. А. КОЗЕЧКО (УКРАИНА)

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ УДАРНЫХ ВОЛН

Исследовано влияние предварительного ударно-волнового нагружения на процессы химико-термической обработки. Установлены взаимные связи между глубиной легированного слоя и интенсивностью предварительной ударно-волновой обработки в целях повышения ресурса деталей из конструкционных сталей.

Впервые экспериментально установлены закономерности изменения параметров зоны насыщения в процессе химико-термической обработки стали от интенсивности пластической деформации.

Определено, что применение в качестве стимулирующего фактора предварительной ударно-волновой обработки приводит к увеличению глубины легированного слоя при борировании в 1,5–2,0 раза и упрочнению поверхностного слоя (микротвердость повышается 1,4–1,8 раза).