

Прогнозирование размера зерна наноструктур при действии ионов различных сортов, зарядов и энергий на магниевые сплавы

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»
Харьковский национальный университет радиоэлектроники*

Получены размеры зерна при действии ионов B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+ на магниевые сплавы в зависимости от их энергии и заряда. Показано, что есть возможность выбора технологических режимов плазменно-ионных установок для получения наноструктур требуемого размера и толщины в зависимости от энергии ионов, их заряда и сорта, что позволяет получать наноструктурные слои толщиной до десятков и сотен микрометров. По размеру зерна можно оценить физико-механические характеристики наноструктурного слоя.

Ключевые слова: размер зерна, плазменно-ионная обработка, ионы, энергия иона, заряд иона, магниевые сплавы.

Введение

В настоящее время имеется значительное количество оригинальных работ по изучению возможности получения наноструктур [1–18], но в этих работах практически отсутствуют теоретические основы прогнозирования технологических параметров обработки для получения наноструктур. Исключение составляют обзоры [1–2], но здесь такие результаты получены для сталей. Применение в авиационной технике магниевых сплавов выдвигает на передний план проблемы повышения их работоспособности, а следовательно, и физико-механических характеристик поверхностных слоев. Традиционные покрытия не дают существенных результатов, так как эти покрытия не позволяют повысить усталостную прочность, а значит, и работоспособность изделия в целом.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Состояние вопроса

Магниевые сплавы обладают довольно высоким соотношением физико-механические характеристики – удельный вес, но в то же время для их широкого использования в авиационно-ракетной технике необходимо обеспечить уникальные физико-механические характеристики поверхностных слоев [1–7]. Такими ха-

характеристиками обладают наноструктурные покрытия и наноструктурные защитные слои, которые позволяют существенно повысить усталостную прочность, ударную вязкость, коррозионную стойкость и износостойкость за счет эффекта повышенной их твердости, приближающейся к твердости алмаза при малом модуле упругости, что дает возможность им выдерживать высокие ударные нагрузки, сохраняя геометрические размеры. Наноструктуры (многие из них) обладают свойствами как органического, так и неорганического вещества, что позволяет удерживать смазку на основном материале детали и обеспечивать повышенный ресурс узла.

Все эти свойства наноструктур дают возможность утверждать, что магниевые сплавы с наноструктурными слоями будут эффективными как конструкционные материалы даже для высоконагруженных деталей авиационной и ракетно-космической техники.

Целью данной статьи является исследование влияния технологических параметров плазменно-ионной обработки (энергии ионов, его сорта и заряда) на размер зерна, что позволит прогнозировать физико-механические характеристики (ФМХ) поверхностных слоев магниевых сплавов и оценить возможность получения наноструктур.

Постановка задачи

Размер зерна определяли по модели, предложенной в работе [1], где решена совместная задача теплопроводности и термоупругости с учетом энергии, затрачиваемой на кристаллизацию. Это дало возможность получить более точные результаты по величине размера зерна при действии ионов различных сортов, энергий и зарядов на магниевые сплавы. Всё это позволило определить температуры в зоне действия индивидуального иона, скорости изменения температур, по которым находили зону материала, где реализуются условия для получения наноструктур. В качестве критериев использовали диапазон температур (500...1500 K), при которых возможно получение наноструктур, оценивали также скорость изменения температуры, которая должна быть более 10^7 K/с. Для таких зон определяли объем нанокластера и в предположении сферического зерна вычисляли радиус, а значит, и размер зерна.

Такие исследования были проведены для широкого круга ионов B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+ , действующих на магниевый сплав, что позволяет по прогнозируемым зависимостям физико-механических характеристик от размера зерна определить соответствующие характеристики для того или иного слоя наноструктур в зависимости от энергии иона, его сорта и заряда. Всё это еще раз подтверждает актуальность исследования размера зерна в зависимости от технологических параметров.

Результаты исследований

Исследованы зависимости радиуса нанокластера (НК) от энергии ионов для различных их зарядов ($z = 1$, $z = 2$, $z = 3$). Так, для случая действия ионов бора и углерода такие результаты показаны на рис. 1, а. Видно, что для ионов бора радиус нанокластера практически на порядок больше, чем для углерода ($z = 3$), с уменьшением заряда до $z = 2$ разница значений несколько уменьшается и при $z = 1$ она составляет уже 3...5 нм.

В случае действия ионов азота и алюминия на магниевые сплавы (рис. 1, б) разница между значениями для трехзарядных ионов составляет порядка 30 нм при $z = 1$, с увеличением заряда максимальные значения радиуса отличаются примерно на 15 нм, а при $z = 1$ они отличаются на 1...4 нм.

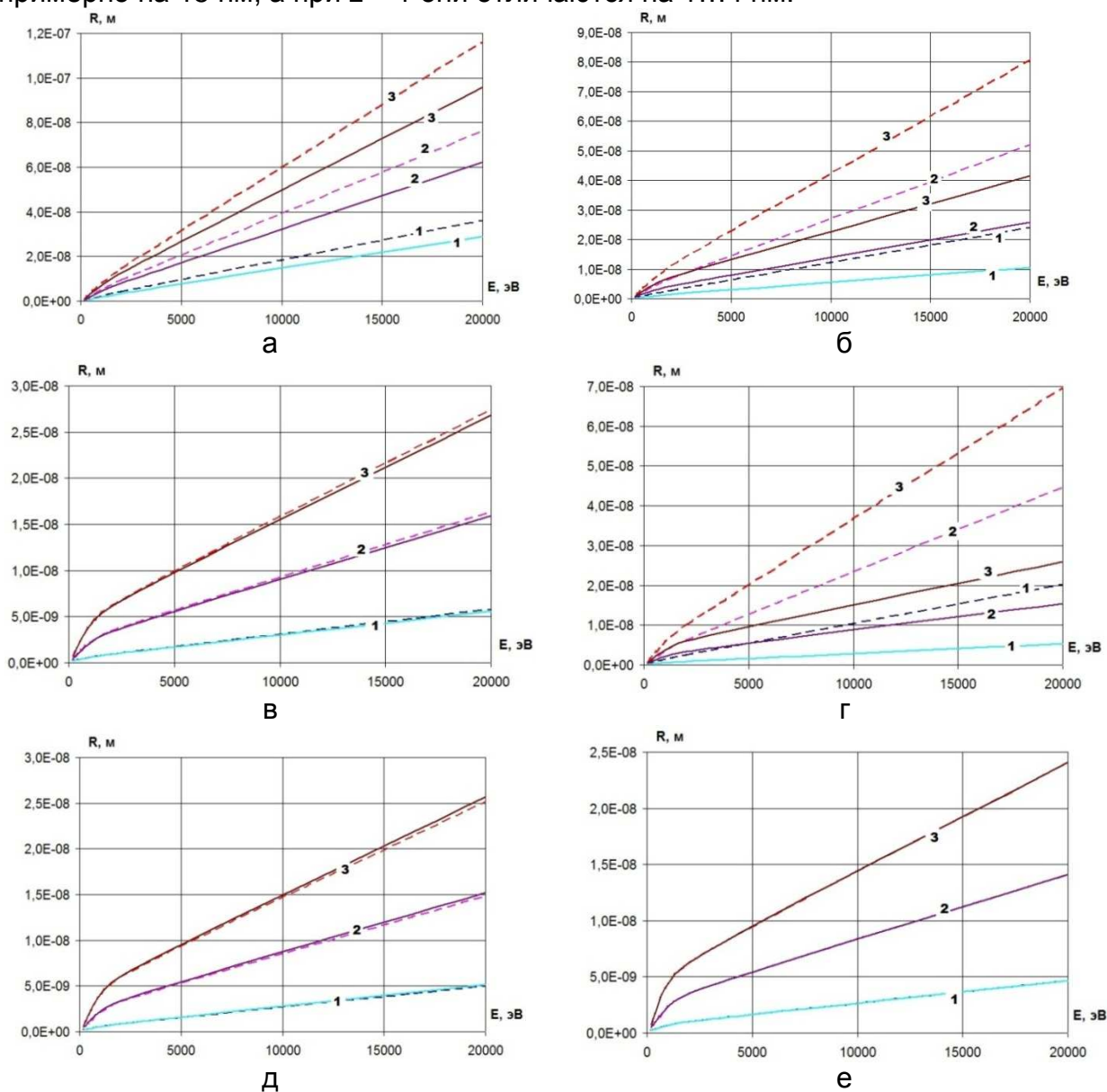


Рис. 1. Зависимости радиуса зерна R от энергии ионов V^+ (---) и C^+ (—) (а); N^+ (---) и Al^+ (—) (б); V^+ (---) и Cr^+ (—) (в); O^+ (---) и Fe^+ (—) (г); Ni^+ (---) и Co^+ (—) (д); Y^+ (---) и Zr^+ (—) (е) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для магниевых сплавов

Переход к ионам ванадия и хрома приводит к практически одинаковым значениям радиуса зерна для этих ионов, и для больших Z они составляют значения порядка $2,7 \cdot 10^{-8}$ м, для $z = 2$ – порядка $3,6 \cdot 10^{-8}$ м и для $z = 1$ их значения лежат вблизи 6 нм.

Переход к ионам кислорода и железа приводит к существенному отличию размеров зерна, которые для кислорода составляют порядка 70 нм ($z = 3$) и для железа – порядка 26 нм. Значительное отличие радиуса нанокластера наблюда-

ется и для $z = 2$, составляющее 45 и 15 нм соответственно. Для $z = 1$ эти значения лежат в диапазоне от 2,2 до 5 нм. Видно, что в этих условиях даже для высоких энергий реализуются наноструктуры, что позволяет использовать эти ионы для образования наноструктур практически во всем диапазоне энергий (рис. 1, г).

Для ионов никеля и кобальта реализуются практически одинаковые радиусы зерна во всем диапазоне энергий ионов (рис. 1, д), что дает возможность заменять один ион другим при получении наноструктур, выбирая наименее дорогой.

В то же время для ионов иттрия и циркония реализуются значения размеров зерна, практически одинаковые при энергии $2 \cdot 10^4$ эВ, они составляют около 24 нм ($z = 3$), при $z = 2$ они уже имеют значения 14 нм, а при $z = 1$ – порядка 4 нм (рис. 1, е).

Так, зависимости радиуса зерна от энергии ионов молибдена, гафния, тантала, вольфрама, платины показаны на рис. 2.

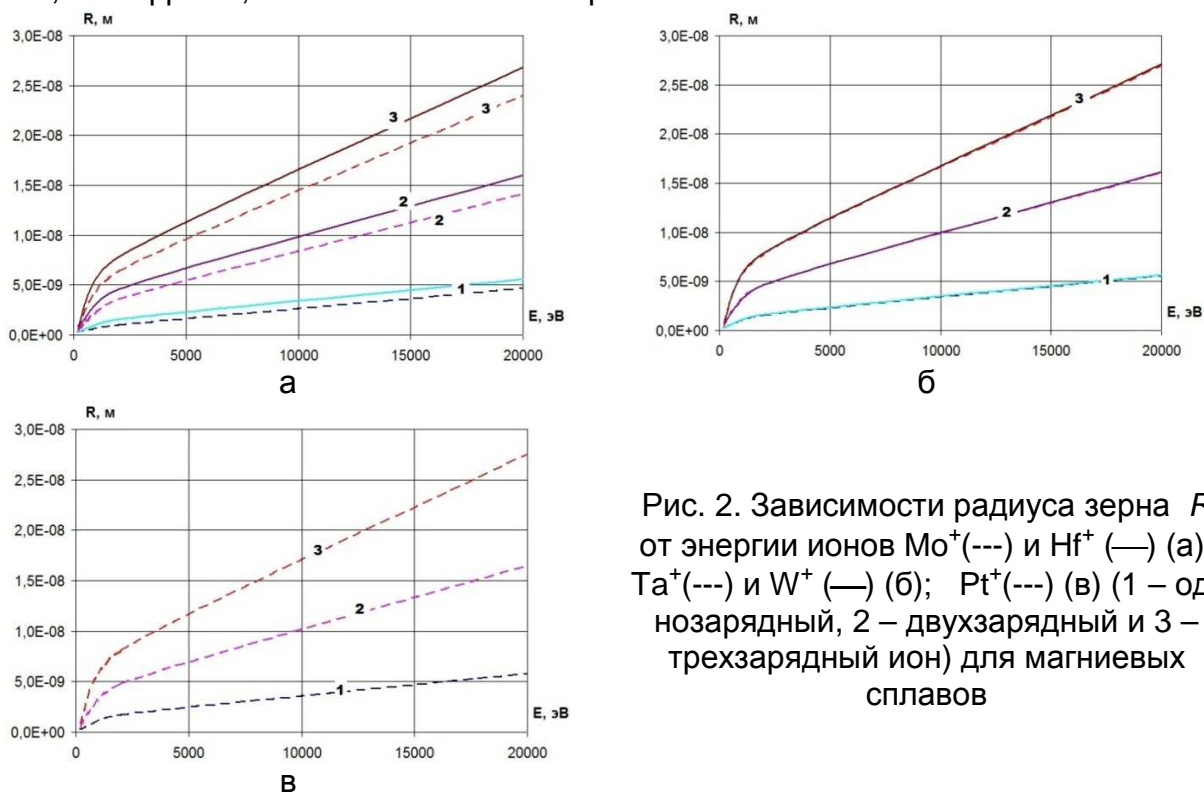


Рис. 2. Зависимости радиуса зерна R от энергии ионов Mo^+ (---) и Hf^+ (—) (а); Ta^+ (---) и W^+ (—) (б); Pt^+ (---) (в) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для магниевых сплавов

Видно, что для случая действия ионов молибдена и гафния (рис. 2, а) наблюдается относительно небольшое отличие значений размера зерна даже для энергии $2 \cdot 10^4$ эВ ($z = 3$), тогда как при $z = 2$ эти значения уменьшаются и при $z = 1$ они составляют порядка 1 нм.

Для ионов тантала, вольфрама и платины реализуются практически одинаковые зависимости радиуса НК от энергии и максимальные величины радиуса нанокластера составляют 27 нм ($z = 3$), для $z = 2$ они составляют порядка 16 нм, а для $z = 1$ порядка 6 нм.

Видно, что для однозарядных ионов практически всегда реализуются наноструктуры, что позволяет использовать эти ионы для образования наноструктур на поверхности магниевых сплавов, причем можно выбирать наиболее дешевый из этих ионов, так как результат будет одинаков.

Выводы

1. Проведенные исследования позволяют прогнозировать размер зерна в широком диапазоне энергий и зарядов от 1 до 3, что, в свою очередь, позволит оценить ФМХ поверхностных слоев.

2. Показано, что для ряда ионов реализуются практически одинаковые зависимости размера зерна от энергии практически для всех исследованных зарядов ионов, что позволяет использовать их, выбирая наиболее дешевые ионы и получая одинаковый результат.

Список литературы

1. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст]: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.

2. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.

3. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002.– Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с.

4. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с.

5. Костюк, Г. И. Наноструктуры и нанопокртытия: перспективы и реальность [Текст]: учеб.пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.

6. Костюк, Г. И. Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб.пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.

7. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.

8. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г. И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с.

9. Костюк, Г. И. Физико-технические основы роботизированного производства [Текст]: учеб.пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с.

10. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.

11. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И. И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.

12. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.

13. Решетняк, Е. Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е. Н. Решетняк, А. И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130.

14. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.

15. Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А. А Гончаров, П. И. Игнатенко, В. В. Петухов и др. // ЖТФ. –2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 82 – 87.

Поступила в редакцию 12.02.2015

Прогнозування розміру зерна наноструктур при дії іонів різних сортів, зарядів і енергій на магнієві сплави

Отримано розміри зерна при дії іонів В +, N +, С +, Al +, V +, Cr +, O +, Ni +, Zr +, Mo +, Hf +, W +, Ta +, Pt + на магнієві сплави залежно від їх енергії і заряду. Показано, що є можливість вибору технологічних режимів плазово-іонних установок для отримання наноструктур необхідного розміру і товщини залежно від енергії іонів, їх заряду і сорту, що дозволяє отримувати наноструктурні шари товщиною до десятків і сотень мікрометрів. За розміром зерна можна оцінити фізико-механічні характеристики наноструктурного шару.

Ключові слова: розмір зерна, плазово-іонна обробка, іони, енергія іона, заряд іона, магнієві сплави.

Prediction of grain size of nanostructures under the influence of various sorts of ions, charge and energy in the magnesium alloys

Get the size of a grain by the action of the ion B +, N +, C +, Al +, V +, Cr +, O +, Ni +, Zr +, Mo +, Hf +, W +, Ta +, Pt + for magnesium alloys depends on their energy, and charge is shown that there is a choice of technology mode plasma ion installations of obtaining of nanostructures desired size and thickness, depending on the energy of the ions and their behind-the-range and variety that produces nanostructured layers with thickness up to tens and hundreds of micrometers. The size of the grain can be assessed physical and mechanical properties of nanostructured layers.

Keywords: grain size, plasma ion processing, ions, ion energy, ion charge, magnesium alloys.