

Исследование влияния энергии образования нанокластера на размер зерна при действии ионов различных сортов, зарядов и энергий на алюминиевые сплавы

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Проведено исследование влияния энергии образования нанокластера при действии ионов V^+ , N^+ , C^+ , V^+ , Cr^+ , Al^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ (одно-, двух- и трехзарядных) на размер зерна. Исследованы зависимости размера зерна от энергии действующего одно-, двух- и трехзарядного иона. Показано, что необходимо затратить дополнительную энергию, а зависимости размера зерна от энергии смещаются в сторону больших энергий, наибольшее смещение реализуется для легких ионов V^+ , N^+ , C^+ и O^+ , которое может достигать тысячи электрон-вольт при первичной энергии $2 \cdot 10^4$ эВ.

Ключевые слова: ион, размер зерна, нанокластер, алюминиевый сплав, заряд иона, энергия иона.

Введение

В работах [1–3] были рассмотрены особенности влияния энергии и заряда ионов (V^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+) на размер зерна нанокластера, но не была учтена энергия на образование кристалла, что не позволяет с высокой достоверностью говорить о полученных зависимостях. В то же время величина зерна определяет физико-механические характеристики наноструктурированного слоя материала. Поэтому точность определения технологических параметров потока ионов для получения требуемых свойств поверхностного слоя напрямую зависит от точности выявления значений технологических параметров энергии и заряда иона. Всё это свидетельствует о том, что предлагаемое исследование влияния энергии, затрачиваемой на образование зерна в наноструктуре, на размер зерна является своевременным и актуальным, так как имеет большое практическое значение.

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», хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

Состояние вопроса

Исследованию наноструктур посвящено значительное число оригинальных работ, результаты которых обобщены в монографиях [1–10]. К сожалению, работ по теоретическому рассмотрению образования наноструктур при действии потоков заряженных частиц относительно немного, а среди монографий можно отме-

тить только [1, 2]. Всё это не позволяет оценить возможность реализации наноструктур при тех или иных технологических параметрах потоков, а полномасштабный эксперимент по выявлению влияния технологических параметров на размер зерна и, в конечном счете, на физико-механические характеристики слоя с наноструктурами. Очевидно, необходимо повышать точность расчетов, что возможно при учете тех факторов, которые ранее в работах [1–3] не были учтены. К таким факторам относится энергия, затрачиваемая на образование зерна.

В предлагаемой работе на основе квантово-механической теории рассмотрена величина энергии, затрачиваемая на образование кристалла, которую необходимо учитывать в балансе тепла в элементарном объеме материала. Это свидетельствует о том, что дополнительная энергия на образование зерна может существенно повлиять на характер зависимости размера зерна от энергии и величины заряда иона.

Постановка задачи

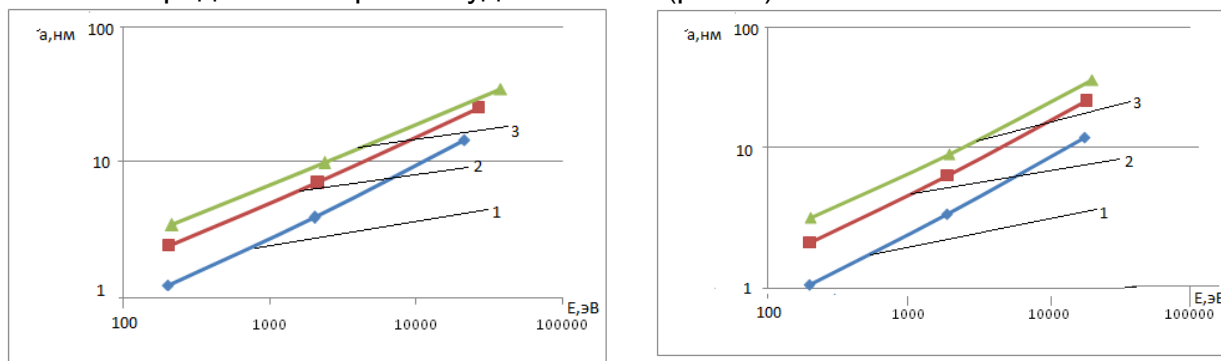
Решена совместная задача теплопроводности и термоупругости в зоне действия индивидуальных ионов с учетом повышения температуры под влиянием интегрального нагрева всей детали. При решении задачи рассмотрены процессы в объеме материала (теплопроводность, смещение фронта испарения, действие иона как объемного источника тепла, объемный источник тепла под действием джоулева нагрева, энергия, затрачиваемая на термоупругое и термопластическое деформирование, энергия, затрачиваемая на плавление). На поверхности детали рассмотрен источник тепла, возникающий под действием иона (доля, выделяемая на поверхности); эмиссионное охлаждение с уходящими электронами; тепло, поступающее и удаляемое с поверхности под действием взаимооблучения плазмы и поверхности тела; теплообмен под влиянием конденсации частиц, а также целого ряда видов излучений и испарения [1].

Решение этой задачи дает возможность получить поля температур и температурных напряжений, которые позволят выявить зоны материала, где реализуются критерии, необходимые для образования наноструктур: требуемые температуры 500...1500K; скорости нарастания температур более 10^7 K/c и, желательно, наличие напряжений (давлений порядка 10^7 ... 10^9 Па). Последнее ускорит появление наноструктур. Очевидно, также может повлиять скорость деформирования. Указанные величины могут быть рассчитаны при решении этой задачи, а значит, можно выделить объем материала, в котором будут реализованы наноструктуры.

Результаты расчетов

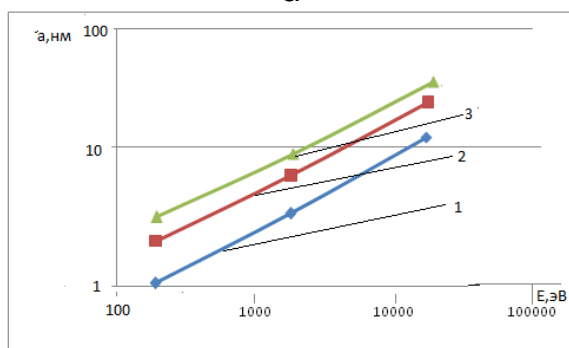
Расчеты размера наноструктур проводили в предположении, что наноструктура имеет форму сферы, а её размер равен диаметру этой сферы. На рис. 1–6 показаны зависимости размера зерна от энергии иона для однозарядных, двухзарядных и трехзарядных ионов, действующих на алюминиевый сплав Д16. Так, на рис. 1 изображены такие зависимости для случая действия ионов бора, углерода и азота соответственно. Видно, что требуется большая энергия для реализации размера зерна, такого же, как и в случае, когда энергия, затрачиваемая на его образование, не учитывается [11].

Переход же к ионам алюминия, ванадия и хрома приводит к несколько меньшим величинам этой дополнительной энергии и зависимости смещаются меньше. Но всё равно для энергий, близких $2 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$ эВ, они остаются значительными. Влияние заряда иона в этом случае также существенно, и для больших величин заряда эта поправка будет больше (рис. 2).



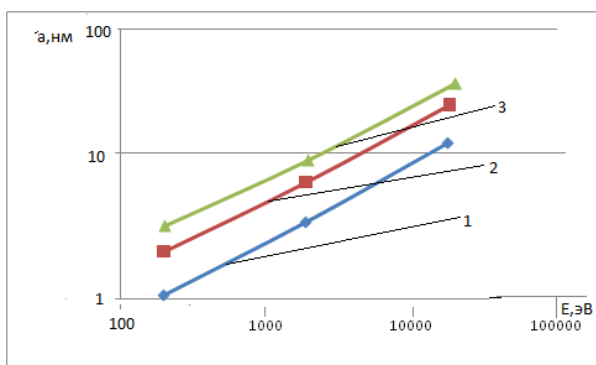
а

б

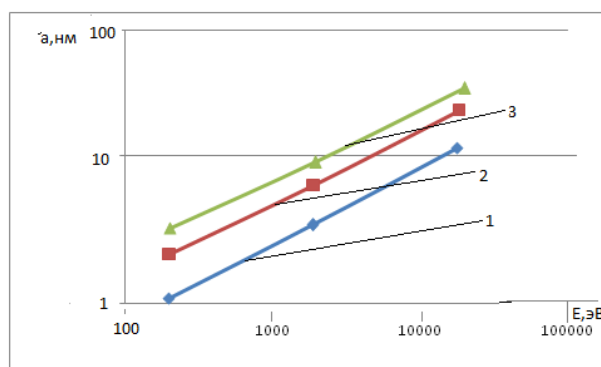


в

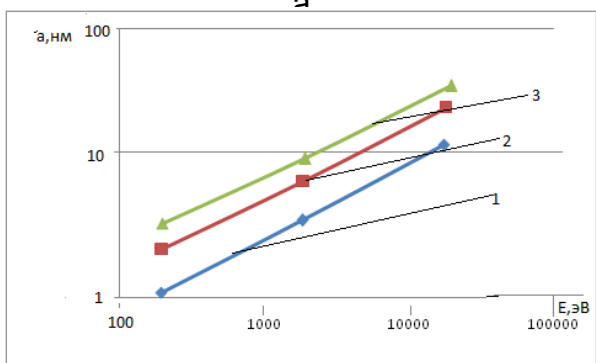
Рис. 3. Зависимость размера зерна от энергии ионов: а – O^+ , б – Fe^+ , в – Ni^+ (с зарядом: 1 – $z = 1$; 2 – $z = 2$ и 3 – $z = 3$) при их действии на алюминиевый сплав D16T



а



б



в

Рис. 4. Зависимость размера зерна от энергии ионов: а – Co^+ , б – Y^+ , в – Zr^+ (с зарядом: 1 – $z = 1$; 2 – $z = 2$ и 3 – $z = 3$) при их действии на алюминиевый сплав D16T

Аналогичные зависимости для ионов кислорода, железа и никеля показаны на рис. 3. Видно, что повышение энергии особенно существенно для кислорода, что связано с его малым атомным весом. В этом случае также наблюдается существенная зависимость размера зерна от энергии и заряда иона. Для ионов железа и никеля (рис. 3, б, в) энергии кристаллизации в меньшей степени влияют на характер кривых, так как даже при энергии $2 \cdot 10^4$ эВ эти добавки энергии не превышают 150 эВ, что не столь влияет на значения технологических параметров при обработке.

Переход к ионам кобальта, иттрия и циркония (рис. 4) позволяет с достаточной точностью не учитывать энергию, затрачиваемую на образование зерна для одно- и двухзарядных ионов, тогда как для трехзарядных ионов при больших энергиях её необходимо учитывать.

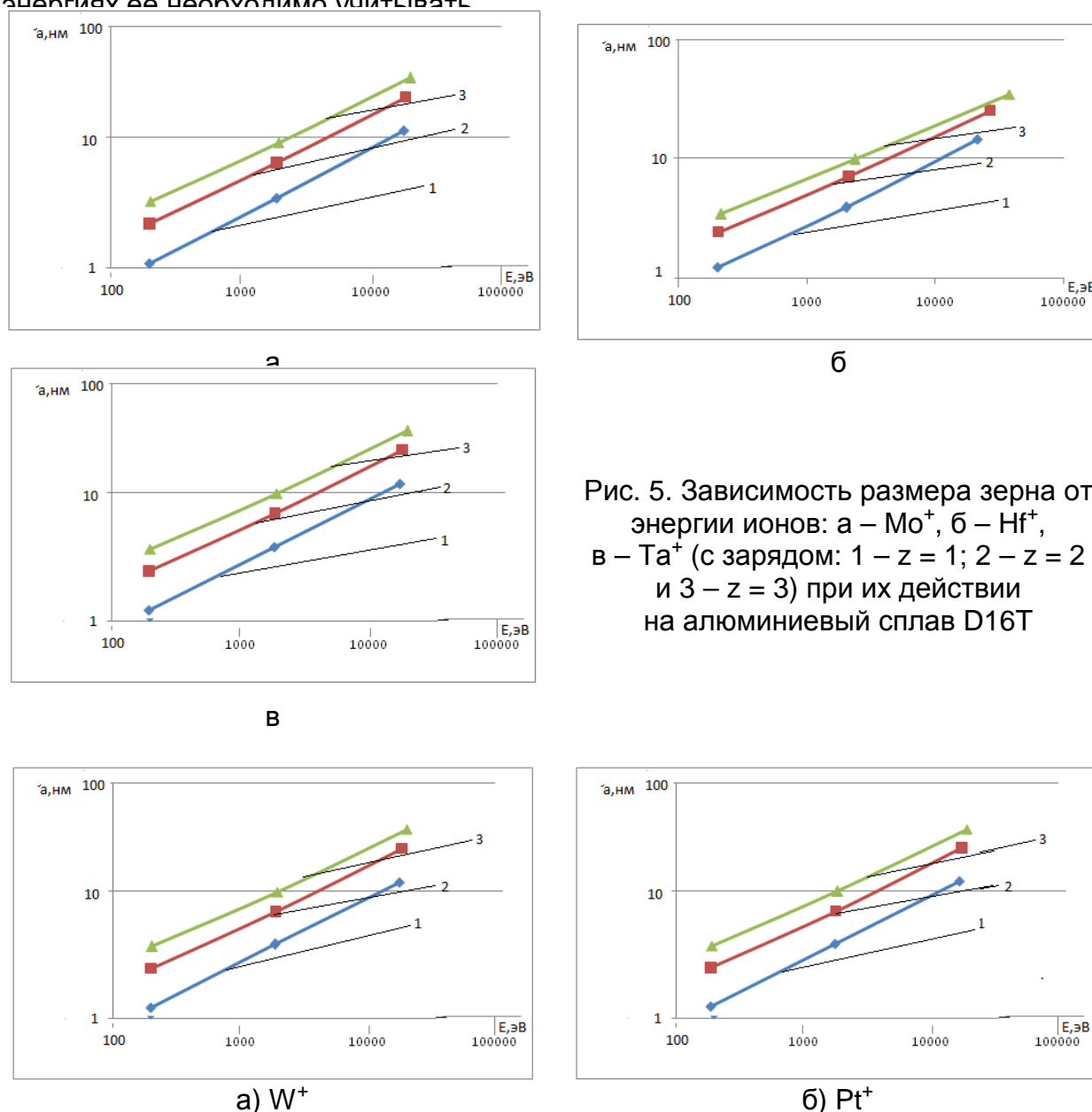


Рис. 5. Зависимость размера зерна от энергии ионов: а – Mo⁺, б – Hf⁺, в – Ta⁺ (с зарядом: 1 – z = 1; 2 – z = 2 и 3 – z = 3) при их действии на алюминиевый сплав D16T

Рис. 6. Зависимость размера зерна от энергии ионов: а – W⁺, б – Pt⁺ (с зарядом: 1 – z = 1; 2 – z = 2 и 3 – z = 3) при их действии на алюминиевый сплав D16T

На рис. 5 показаны зависимости размера зерна при действии ионов молибдена, гафния и тантала на алюминиевый сплав Д16. Видно, что для трехзарядных и даже двухзарядных ионов гафния необходимо учитывать энергию, затрачиваемую на образование зерна, так как она в этом случае существенна, что связано с характером выделения энергии иона гафния в довольно тонком слое материала. Значит, при больших энергиях и зарядах влияние энергии кристаллизации будет более существенно.

Такие же зависимости для случая действия ионов вольфрама и платины на алюминиевый сплав Д16Т показаны на рис. 6. Видно, что в этом случае учет энергии кристаллизации довольно высокой точностью можно не проводить.

Выводы

1. Исследование влияния энергии кристаллизации на характер зависимостей размера зерна от энергии и заряда ионов (B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+) показало существенное влияние этой энергии, наблюдаемой для ионов малой массы. Для большей части ионов это влияние существенно при максимальных рассмотренных энергиях и максимальном заряде иона.

2. Полученные зависимости размера зерна от энергии и заряда иона позволяют оценить технологические параметры и сорта ионов, при которых реализуются наноструктуры требуемого размера, так как физико-механические характеристики (ФМХ) слоя будут зависеть от размера зерна, при выборе которого можно получить требуемые ФМХ.

3. Проведенные исследования дают возможность существенно приблизиться к научным основам выбора технологических параметров потоков ионов для получения слоев с необходимыми ФМХ.

Список литературы

1. 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.

2. 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.

3. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст]: в 2 кн. / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – 1030 с.

4. 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.

5. Костюк, Г. И. Эффективные покрытия и модифицированные упрочненные слои на режущих инструментах [Текст]: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 728 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 АНУ, 2003. – 412 с.

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

10. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А. И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.

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

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

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф., декан А. И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет «ХАИ» им. Н.Е. Жуковского, Харьков
Поступила в редакцию 00.00.2014

Дослідження впливу енергії утворення нанокластера на розмір зерна при дії іонів різних сортів, зарядів і енергій на алюмінієві сплави

Проведено дослідження впливу енергії утворення зерна при дії іонів B^+ , N^+ , C^+ , V^+ , Cr^+ , Al^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ (одно-, дво- і тризарядних) на його розмір. Досліджено залежності розміру зерна від енергії діючого одно-, дво- і тризарядного іона. Показано, що необхідно затратити додаткову енергію, а залежності розміру зерна від енергії зміщуються у бік великих енергій, найбільше зміщення реалізується для легких іонів B^+ , N^+ , C^+ і O^+ , яке може досягати тисячі електрон-вольтів при первинній енергії $2 \cdot 10^4$ eV.

Ключові слова: іон, розмір зерна, нанокластер, алюмінієвий сплав, заряд іона, енергія іона.

Investigation of the effect of the energy of formation of nanoclusters on the grain size by the action of ions of different varieties, charge and energy on aluminum alloys

An account of the impact energy of formation of the grain by the action of the ions B^+ , N^+ , C^+ , V^+ , Cr^+ , Al^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ (single, double and triply charged) on the grain size. A study of the grain size dependence of the energy of the current single, double and triply charged ion. It has been shown that it is necessary to expend extra energy, and depending on the grain size of the energy shifts toward higher energies, the greatest displacement occurs for light ions B^+ , N^+ , C^+ and O^+ , which can reach thousands of eV primary energy $2 \cdot 10^4$ eV.

Keywords: ion, grain size, nanocluster, aluminum alloy, ion charge, ion energy.